

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2012

Bc. Petr Černý

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

# **Měřič optického výkonu**

## **Optical power meter**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Černý**  
Studijní program: **N2647 Informační a komunikační technologie**  
Studijní obor: **2601T013 Telekomunikační technika**  
Téma: **Měřič optického výkonu**  
**Optical Power Meter**

Zásady pro vypracování:

1. Popište princip měření optického výkonu proměnného v čase a konstantního v čase.
2. Navrhněte schéma měřiče optického výkonu pro měření časově proměnného optického výkonu.
3. Realizujte funkční model měřiče optického výkonu.
4. Změřte mez citlivosti měřiče optického výkonu.

Seznam doporučené odborné literatury:


Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 30. dubna 2012



.....  
Bc. Petr Černý

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi za jeho připomínky a odbornou pomoc při vypracování této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá popisem, návrhem a zkonstruováním měřiče optického výkonu. Nejdříve si popíšeme princip měření optického výkonu. Aby bylo možné změřit nějaký výkon, budou zmíněny zdroje optického záření. Velký důraz bude kladen na popis fotodetektorů, zejména fotodiod. Dále budou rozebrány jednotlivé komponenty, ze kterých se měřič skládá. V další části přijde na řadu návrh, realizace a kalibrace měřiče optického výkonu. Poslední část je věnována změření meze citlivosti měřiče.

## **Klíčová slova:**

Měřič optického výkonu OPM, vlnová délka, fotodetektor, fotodioda PIN, operační zesilovač, přepínač rozsahu, A/D převodník, displej

## **Abstract**

This thesis deals with the description, design and construction of an optical power meter. First, the principle of optical power measurement is described. In order to be able to measure any power, sources of optical radiation are defined. Special emphasis is put on the description of photodetectors, particularly photodiodes. Next, the components of the meter are analysed. In the following part, the optical power meter is designed and constructed. The last section describes the measurement of the meter sensitivity limits.

## **Key words:**

Optical power meter OPM, wavelength, photodetectors, photodiode PIN, IR area, operational amplifier, range switch, A/D converter

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A/D	Analog/Digital	Analogově/digitální
APD	Avalanche photodiode	Lavinová fotodioda
C	Capacitor	Kondenzátor
D	Diode	Dioda
dB	Decibel	Jednotka útlumu
dBm	Decibel referenced to one mW	Jednotka hladiny útlumu
DC	Direct current	Stejnoseměrný proud
f	Frequency	Frekvence
Ge	Germanium	Germánium
Hz	Hertz	Jednotka frekvence
I	Current	Proud
$I_{dk}$	Dark current	Temný proud
InGaAs	Indium gallium arsenide	Indium gallium arsenid
$I_{ph}$	Photocurrent	Fotoproud
IR	Infrared	Infračervené optické záření
Laser	Laser	Laser
LCD	Liquid crystal display	Displej z tekutých krystalů
LD	Laser diode	Laserová dioda
LED	Light emission diode	LED dioda
m	Meter	Metr – jednotka délky
NA	Numeric aperture	Numerická apertura
NEP	Noise equivalent power	Úroveň vlastního šumu
NIR	Near – infrared	Blízká infračervená
OPM	Optical power meter	Měřič optického výkonu
OZ	Operational Amplifier	Operační zesilovač
P	Performance	Výkon
PbS	Lead sulfide	Sulfid olova
PD	Photodetector	Fotodetektor
PIN		Fotodioda typu PIN
PN		Polovodič typu PN
R	Resistor	Rezistor
Si	Silicon	Křemík
SNR	Signal to noise ratio	Poměr signálu k šumu
U	Voltage	Napětí
UV	Ultraviolet	Ultrafialové optické záření
VIS	Visible	Viditelné optické záření
W	Watt	Watt – jednotka výkonu
$\lambda$	Wavelength	Vlnová délka

# OBSAH

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2 SVĚTLO.....</b>	<b>2</b>
2.1 Fotometrie .....	2
2.1 Lidské oko .....	2
2.3 Rozložení elektromagnetického spektra.....	3
2.3.1 Ultrafialové spektrum .....	3
2.3.2 Viditelné spektrum.....	4
2.3.3 Infračervené spektrum.....	4
<b>3 MĚŘENÍ OPTICKÉHO VÝKONU .....</b>	<b>5</b>
3.1 Měřiče optického výkonu.....	5
3.2 Měření útlumu na optických trátích .....	5
3.2.1 Metoda dvou délek.....	6
3.2.2 Metoda vložného útlumu .....	6
3.2.3 Metodazpětného rozptylu.....	6
3.3 Jednotky naměřeného výkonu .....	6
3.4 Přesné měření optického výkonu .....	7
3.5 Blokové schéma měřiče optického výkonu.....	8
3.6 Kalibrace měřičů optického výkonu.....	9
3.6.1 Kalibrace metodou superpozice .....	9
<b>4 ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ.....</b>	<b>11</b>
4.1 LED diody .....	11
4.1.1 Princip činnosti LED diody.....	11
4.2 LASEROvé diody .....	12
4.2.1 Princip funkce LASERu.....	12
4.2.2 Princip činnosti LD .....	13
4.2.3 Srovnání zdrojů záření používaných v optoelektronice .....	14
4.3 Optické vlákno .....	14
<b>5 FOTODETEKTORY .....</b>	<b>15</b>
5.1 Parametry fotodetektorů.....	15
5.2 Fotodiody .....	17
5.3 Typy fotodiod.....	19

5.3.1 PIN fotodioda.....	19
5.3.2 Lavinová (APD) fotodioda.....	19
5.4 Nejpoužívanější polovodičové materiály fotodiod.....	19
5.4.1 Si fotodioda.....	19
5.4.2 Ge fotodioda.....	20
5.4.3 InGaAs fotodioda.....	20
<b>6 NÁVRH MĚŘIČE OPTICKÉHO VÝKONU .....</b>	<b>21</b>
6.1 Blokové schéma měřiče optického výkonu.....	21
6.2 Výběr vhodné fotodiody.....	21
6.3 Výběr vhodného zesilovače.....	22
6.3.1 Základní parametry OP07 .....	22
6.3.2 Zapojení pinů obvodu OP07 .....	23
6.3.3 Zapojení OZ jako převodník proud na napětí .....	23
6.3.4 Zapojení OZ jako diferenční zesilovač .....	23
6.4 Výběr A/D převodníku a displeje.....	25
6.5 Schéma měřiče optického výkonu.....	28
6.6 Zdroj napětí .....	29
6.7 Nalezení potřebných rozsahů .....	30
<b>7 REALIZACE FUNKČNÍHO MODELU MĚŘIČE OPTICKÉHO VÝKONU .....</b>	<b>31</b>
7.1 Zhotovení desky plošného spoje .....	31
7.2 Osazení a oživení měřiče optického výkonu .....	32
7.2.1 Panelový digitální voltmetr .....	32
7.3 Mechanická konstrukce .....	33
<b>8 NAMĚŘENÉ HODNOTY .....</b>	<b>36</b>
8.1 Proudový odběr .....	36
8.2 Mez citlivosti měřiče optického výkonu .....	36
<b>9 SEZNAM SOUČÁSTEK .....</b>	<b>39</b>
<b>10 ZÁVĚR.....</b>	<b>40</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>41</b>
<b>PŘÍLOHA.....</b>	<b>43</b>



# 1 ÚVOD

Měření optického výkonu patří k nejzákladnějším měřením v optoelektronice. Vzhledem k významu lze měřič optického výkonu srovnat s ampérmetrem v elektronice. Přístroj pro měření optického výkonu slouží k měření úrovně signálu ve vláknu, určují se pomocí něj trasy s poruchou a dokáže lokalizovat vadné přenosové bloky.

Rozmach optických vláken v telekomunikačních sítích sebou nese požadavek mít k dispozici měřicí zařízení, mezi které bezpodmínečně patří měřič optického výkonu.

Výrazné přednosti přenosu informací na optických kmotočtech vedou k rychlému nasazování optických kabelů nejen v telekomunikačních sítích, ale i v sítích pro přenos dat. Přenosová trasa je vytvořena v požadované délce spojováním výrobních úseků optického kabelu. Kromě optického kabelu trasa může obsahovat optické spojky, optické konektory, spojovací moduly, optické děliče a spoustu dalších prvků.

Bezesporu nejdůležitějším parametrem optické trasy je útlum, který ovlivňuje rozhodujícím způsobem kvalitu přenosu. Měření útlumu optické trasy je potřeba věnovat patřičnou pozornost. Útlum je zapotřebí měřit ve všech etapách výstavby optické sítě i během jejího provozu.

Normy doporučují tři standardní metody měření útlumu optických vláken a tras. Je to metodou dvou délek, metodou vložných ztrát a metodou měření zpětného rozptylu. První dvě metody využívají ke stanovení útlumu zdroj optického záření a měřič optického výkonu a jsou kvůli své podstatě označovány jako transmisní (přímé) metody.

V dnešní době se na trhu vyskytuje nepřehledné množství průmyslových měřičů optického výkonu od různých výrobců. Cena těchto přístrojů není zrovna malá, pohybuje se v řádech tisíců korun, kvalitnější lze pořídit i za desetitisíce. Je tedy v našem zájmu navrhnout a zrealizovat jednodušší a levnější přístroj.

## 2 SVĚTLO

Světlo, stejně jako rádiové, rentgenové a gamma vlny je elektromagnetické vlnění tvořené vzájemně podmíněnými časovými změnami intenzity elektrického a magnetického pole šířícími se v prostoru podle zákonů elektrodynamiky.

### 2.1 Fotometrie

Elektromagnetické vlnění, tedy i světlo, je nositelem energie. Světlo šířící se prostorem lze tedy charakterizovat energií či výkonem procházejícími v daném směru jednotkovou plochou. To jsou veličiny energetické. Ve viditelné oblasti spektra je však v řadě případů nutné charakterizovat záření podle světelného vjemu, který vyvolává v lidském oku. Odpovídající veličiny a jejich jednotky se nazývají fotometrické. Fotometrie tedy definuje a studuje veličiny charakterizující působení světelného záření na lidské oko. Mezi základní fotometrické veličiny patří svítivost, světelný tok, jas a osvětlení.

### 2.2 Lidské oko

Oko tvoří důležitou optickou soustavu, jež umožňuje zobrazovat pozorované vnější okolí na sítnici. Ta slouží jako fotodetektor světla, kde se pomocí tyčinek a čípků zprostředkovávají nervové impulzy pro zrakovou část mozku. Existují tři druhy čípků, které jsou citlivé na červené, modré a zelené světlo. Tyčinky jsou citlivé na celý rozsah viditelného spektra a jsou důležité zejména k vidění za horších světelných podmínek.

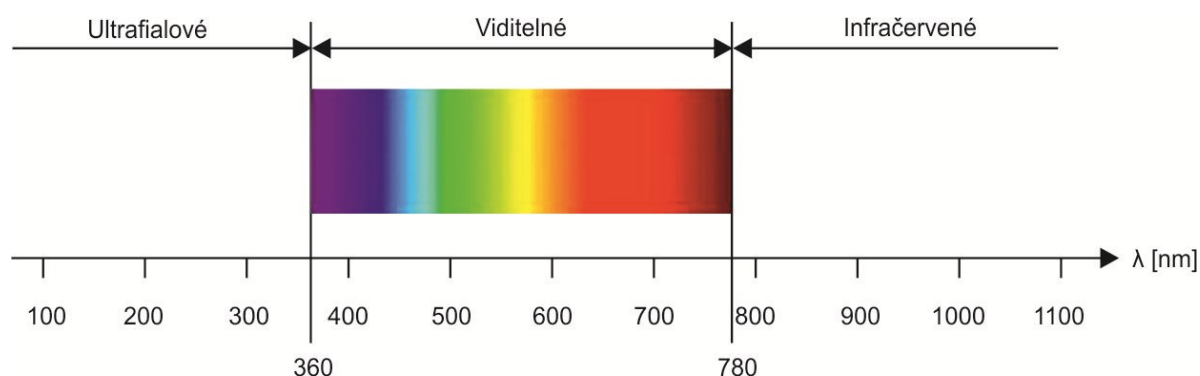
Optická soustava oka je tvořena rohovkou, přední komorou, oční čočkou a sklivcem. Lidské oko není stejně citlivé na všechny vlnové délky světla. Oko je nejcitlivější na zelenožluté světlo o vlnové délce 555nm.

## 2.3 Elektromagnetické spektrum

Viditelné záření																	
Gamma záření		X - záření		UV záření		IR záření		Mikrovlny			Rádiové záření						
									EHF	SHF	UHF	VHF	HF	MF	LF	VLF	
10pm	100pm	1nm	10nm	100nm	1μm	10μm	100μm	1mm	10mm	100mm	1m	10m	100m	1km	10km	100km	[λ]
$3 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$	[Hz]

*Obr. 1: Rozdělení elektromagnetického spektra*

Optické spektrum zabírá vlnové délky 10nm- 1mm elektromagnetického spektra. Optické spektrum se skládá z ultrafialového záření, viditelného záření a infračerveného záření. Člověk může detekovat pouze malý zlomek tohoto spektra, a to viditelné záření na vlnových délkách přibližně 360 – 780nm skrze náš zrak.



*Obr. 2: Rozdělení optického spektra*

### 2.3.1 Ultrafialové záření

UV záření se vyskytuje na vlnových délkách 10nm až 360nm. Dále se dělí na blízké ultrafialové záření o vlnové délce 360 – 200nm a daleké ultrafialové záření (200 – 10nm). UV záření je zapotřebí v různých oblastech vědy a techniky. Využívá se zejména v kosmickém výzkumu a medicíně. V praxi se používá např. k povrchové úpravě materiálů nebo dezinfekci potravin a pitné vody. V optoelektronice a telekomunikačních přenosech nemá velkého uplatnění.

### 2.3.2 Infračervené záření

Zdrojem IR záření je každé těleso, které má teplotu vyšší než absolutní nula. Je způsobeno změnou elektromagnetického pole vyvolaného pohybem elementárních částic hmoty (molekul a atomů).

Vyskytuje se na vlnových délkách 780nm až 1mm, přičemž se dále dělí na blízké infračervené pásmo (0,78 – 5μm), střední infračervené pásmo (5 – 30μm) a dlouhé infračervené pásmo (30 – 1000μm). Pro telekomunikační přenosy se používají především vlnové délky 850, 1310 a 1550nm, tzv. transmisní okna, která se řadí právě do blízkého infračerveného pásma.

Pásmo	Vlnová délka	Frekvence
O	1260 až 1360nm	238 až 220THz
E	1360 až 1460nm	220 až 206THz
S	1460 až 1530nm	206 až 196THz
C	1530 až 1565nm	196 až 191THz
L	1565 až 1625nm	191 až 185THz
U	1625 až 1675nm	185 až 179THz

Tab. 1: Rozdělení IR pásma pro účely optické komunikace

### 2.3.3 Viditelné záření

Je to ta část optického záření, na kterou je citlivé lidské oko. Jednotlivé barvy vyskytující se ve viditelném spektru se nazývají spektrálními barvami a odpovídají jim určité intervaly vlnových délek elektromagnetického záření.

Barva	Vlnová délka	Frekvence
<b>Červená</b>	~ 625 až 740nm	~ 480 až 405THz
<b>Oranžová</b>	~ 590 až 625nm	~ 510 až 480THz
<b>Žlutá</b>	~ 565 až 590nm	~ 530 až 510THz
<b>Zelená</b>	~ 520 až 565nm	~ 580 až 530THz
<b>Azurová</b>	~ 500 až 520nm	~ 600 až 580THz
<b>Modrá</b>	~ 430 až 500nm	~ 700 až 600THz
<b>Fialová</b>	~ 380 až 430nm	~ 790 až 700THz

Tab. 2: Spektrální barvy s odpovídajícími intervaly vlnových délek

### 3 MĚŘENÍ OPTICKÉHO VÝKONU

Optický výkon ( $P_0$ ) udává celkovou vyzářenou energii zdroje za jednotku času. Okamžitý výkon zdroje je dán integrálem časového průběhu intenzity světla po uzavřené ploše obklopující měřený zdroj. [13]

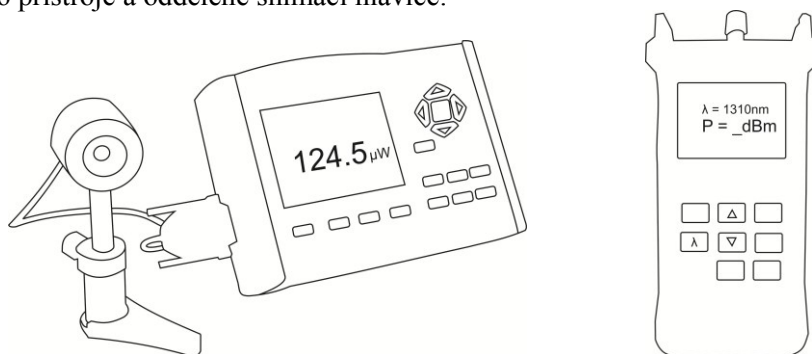
$$P(t) = \oint \vec{I} \cdot d\vec{s}$$

Střední výkon  $P_0$  zdroje v čase  $T$  (pro periodické průběhy  $P(t)$  se volí  $T = 1/f_0$ ) je dán integrálem:

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$$

#### 3.1 Měřič optického výkonu

Měřidlo optického výkonu je přístroj, který je schopen měřit zářivý výkon ze zdrojů, jenž jsou typické pro průmysl optických vláknových komunikací. Tyto zářivé zdroje zahrnují LED, laserové diody a záření skrze optická vlákna. Měřič se může skládat z jednoho přístroje nebo hlavního přístroje a oddělené snímací hlavičky.



Obr. 3: Měřič optického výkonu s odnímatelnou hlavicí a měřič s integrovaným detektorem

#### 3.2 Měření útlumu na optických tratích

Jak již bylo řečeno v úvodu, útlum je jedním z nejdůležitějších parametrů. Posuzují se jím celkové ztráty optického výkonu při šíření optického signálu vláknem. Útlum optického vlákna je určen mezi vstupem a výstupem vlákna podle vztahu:

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad [dB]$$

$P_{in}$  je vstupní optický výkon (W) a  $P_{out}$  je výstupní optický výkon (W) při stejné vlnové délce  $\lambda$ .

### 3.2.1 Metoda dvou délek

Je považována za referenční metodu měření útlumu, protože je velice přesná. K měření je zapotřebí stabilizovaný optický zdroj na vstupu, na výstup se připojí měřič optického výkonu. Princip měření spočívá ve změření výstupního výkonu celé trasy, pak se vlákno zlomí v určité vzdálenosti, např. 2m za zdrojem signálu a změří se vstupní výkon. Tato metoda je destruktivní, nemůže proto být použita pro měření zaběhnutých tras.

### 3.2.2 Metoda vložného útlumu

Metoda vyžaduje stabilizovaný zdroj optického záření na vstupu a měřič optického výkonu na výstupu. Nejprve se kalibruje měřicí souprava referenčním optickým vláknem o délce 2m. Získáme tak hodnotu  $P_1$ . Pak se vymění referenční vlákno za měřené, čímž dostaneme hodnotu výkonu  $P_2$ . Útlum se vypočítá podle výše uvedeného vzorce. Musí ale platit, že vazební ztráty referenčního vlákna a měřeného vlákna jsou stejné. Dále pak musíme počítat s útlumy konektorů a útlumem referenčního vlákna.

### 3.2.3 Metoda zpětného rozptylu

Tato metoda je založena na odlišném principu oproti předchozím metodám. Měří se pouze na jednom konci. Princip spočívá ve vyslání úzkého optického impulsu do měřeného vlákna a vyhodnocuje se časová závislost zpětného rozptylu impulsu. K měření je zapotřebí optický reflektometr.

## 3.3 Jednotky naměřeného výkonu

Výkon optického záření  $P$  [W] vyjadřuje výkon přenášený zářením, tzn. že je určen energií sledovanou plochou v jednotce času. V optoelektronice se častěji měří absolutní úroveň optického výkonu s označením  $L$  v decibelech absolutních, (jednotka dBm), což vyjadřuje úroveň optického výkonu vztaženou k jednomu miliwattu.

$$L = 10 \log \frac{P [mW]}{1 [mW]} \quad [dBm]$$

$$-3 \text{ dBm} = 0,5 \text{ mW}$$

Optický výkon v mW a přepočet na dBm	
10000mW	40dBm
1000mW	30dBm
100mW	20dBm
10mW	10dBm
1mW	0dBm
500 $\mu$ W	-3dBm
100 $\mu$ W	-10dBm
10 $\mu$ W	-20dBm
1 $\mu$ W	-30dBm
100nW	-40dBm
10nW	-50dBm
1nW	-60dBm
100pW	-70dBm

Tab. 3: Přehled jak přepočítat výkon ve W a dBm

### 3.4 Přesné měření optického výkonu

Ve většině zemí slouží k přesnému měření optického výkonu národní etalon, uznaný národním rozhodnutím aby v zemi sloužil jako základ pro přiřazení hodnot jiným etalonům. V ČR se jedná o kryogenní radiometr nacházející se v národní laboratoři. U nás se tato laboratoř nazývá Český metrologický institut. Zajišťuje služby ve všech základních oblastech metrologie:

- fundamentální metrologie, uchovávání a rozvoj státních etalonů, výzkum a vývoj v metrologii
- přenos jednotek, kalibrace etalonů a pracovních měřidel
- legální metrologie, schvalování typu měřidel, prvotní a následné ověřování stanovených měřidel, státní metrologický dozor, posuzování shody u měřidel

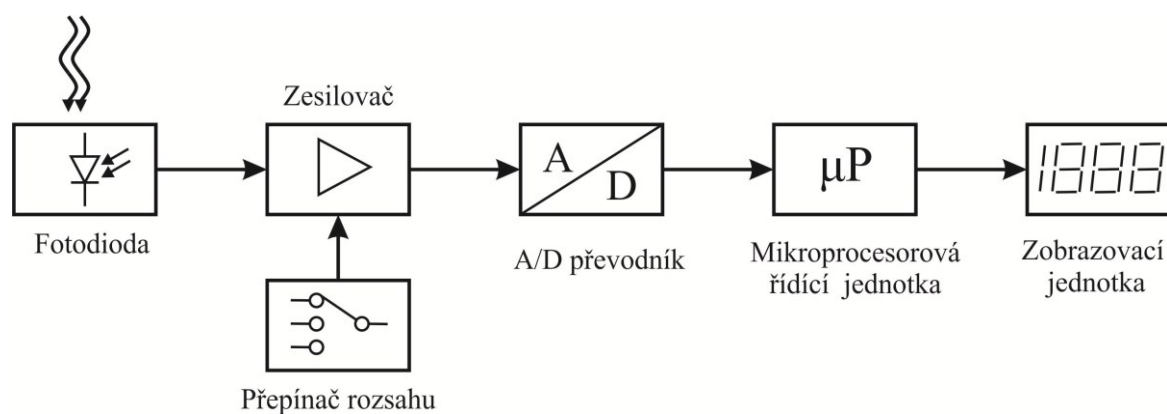
Kalibrace etalonů a měřidel je základním prostředkem při zajišťování návaznosti výsledků měření. Porovnáním s etalony se zjišťují metrologické charakteristiky měřidla. Kalibrací měřidla se dosahuje toho, že jsou buď přiřčeny hodnoty měřených veličin k indikovaným hodnotám, nebo se stanoví korekce vůči indikovaným hodnotám. Výsledek kalibrace je zaznamenán v kalibračním listu.

**Nejlepší schopnosti kalibrace a měření:**

Nejlepší schopnosti kalibrace a měření jsou udány jako rozšířená kombinovaná nejistota pro úroveň pravděpodobnosti pokrytí 95 %

Přístroj	Rozsah kalibrace	Nejlepší schopnosti kalibrace	identifikace metody, poznámky
Detektory UV záření - UV Radiometry	200 až 240 nm	$2,2 \cdot 10^{-2}$	
	240 až 380 nm	$0,96 \cdot 10^{-2}$	
	380 až 405 nm	$0,53 \cdot 10^{-2}$ relativně	
Detektory viditelného záření	360 až 1000 nm	$0,3 \cdot 10^{-2}$ relativně	
Detektory pro vláknovou optiku	800 - 1700 nm	1 - 1,5% relativně dle vlnové délky	
Zdroje záření	380 - 780 nm	$2 \cdot 10^{-2}$ relativně	$0,01 - 80000 \text{ cd/m}^2$

Tab. 4: Nejlepší schopnosti kalibrace

**3.5 Blokové schéma měřiče optického výkonu**

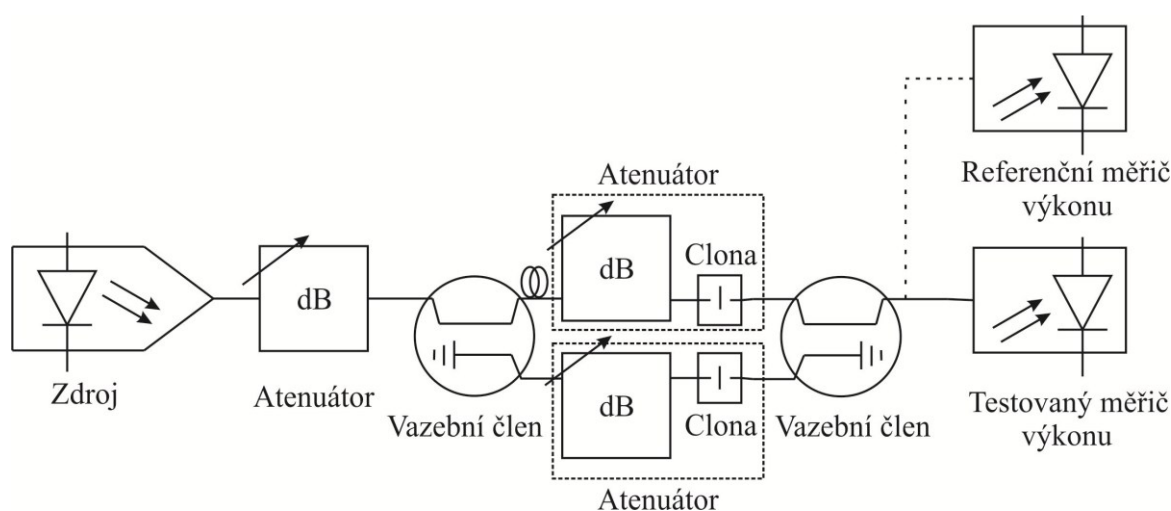
Obr. 4: Blokové schéma měřiče optického výkonu



### 3.6 Kalibrace měřičů optického výkonu

Kalibrace je soubor postupů, při kterém se za předepsaných podmínek stanovují vzájemné vztahy mezi hodnotami veličin, udávaných měřicím přístrojem a odpovídajícími hodnotami získanými z etalonů.

#### 3.6.1 Kalibrace metodou superpozice



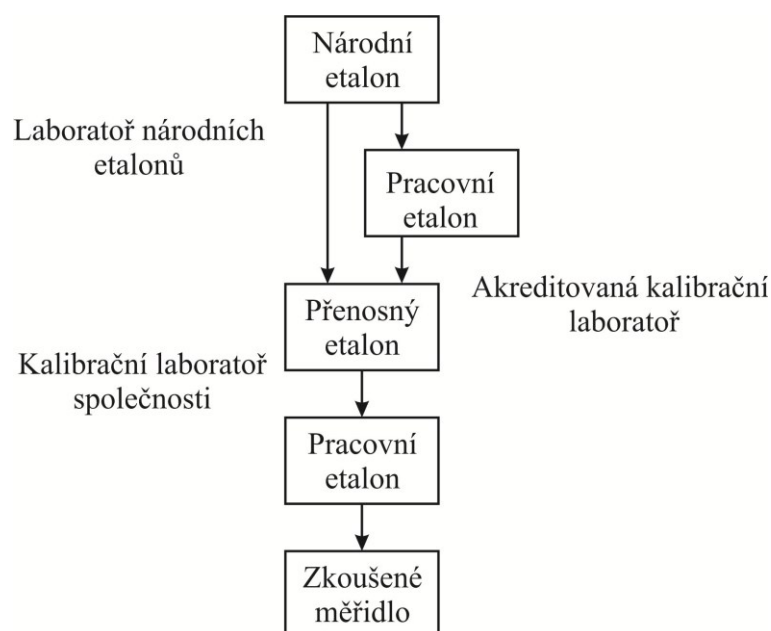
Obr. 5: Kalibrace nelinearity sčítací metodou (superpozice)

Kalibrace založená na metodě superpozice umožňuje vysokou přesnost kalibrace nelinearity. Sčítají se při ní výkony změřené na jednotlivých cestách a porovnávají se s celkovým změřeným výkonem. Vazební člen slouží k rozdělení výkonu do dvou cest, v nichž jsou umístěny clony, poté se opětovně výkony spojují na zkoušeném měřidle výkonu. Atenuátor plní funkci zeslabovače a je zde pro utlumení velkého výkonného signálu z laserového zdroje.

#### Postup:

1. Atenuátory se nastaví tak ve dvou cestách tak, aby výkon měřený měřičem byl stejný, když světlo přichází z jedné nebo druhé cesty.
2. Otevrou se obě clony a změří se celkový výkon z obou cest současně
3. Uzavře se clona v cestě *b* a změří se výkon z cesty *a*.
4. Uzavře se clona v cestě *a*, v cestě *b* se clona otevře a změří se výkon z cesty *b*.
5. Jestliže se součet výkonů z jednotlivých cest nerovná, je zde nelinearita

6. Použitím prvního atenuátoru se celkový útlum vzhledem k úrovním jednotlivých výkonů zmenší na polovinu.
7. Opakují se kroky 2 až 6 pro celý požadovaný rozsah.
8. Dostaneme celkovou nelinearitu součtem všech částečných nelinearit. [4]



Obr. 6: Porovnávání etalonů

Počáteční kalibrace měřicích přístrojů je velice důležitý proces, kterým musí projít každý přístroj, aby dosáhl přesných výsledků. Velice důležitá je také jejich pravidelná kalibrace po určité době. Tato doba je různá, každý výrobce udává vlastní podle provozních podmínek. Na obr.6 je zachycen řetězec návaznosti jednotlivých etalonů pro kalibraci podle předepsané reference.

## 4 ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

Abychom mohli pomocí měřiče optického výkonu naměřit nějaký výkon, potřebujeme k tomu zdroj optického záření.

Pod pojmem zdroj optického záření se myslí těleso, které přetváří určitý typ energie na energii optického záření v elektromagnetickém spektru. Ty se dělí na přirozené a umělé. Mezi přirozené zdroje patří slunce, hvězdy atd.. Umělé zdroje jsou buď tepelné (plameny, žárovky, ..), nebo luminiscenční (luminofory, luminiscenční diody, ..).

V optických systémech se jako zdroje záření používají optické generátory, jejichž princip spočívá v převodu elektrického signálu na signál optický. Díky svým miniaturním rozměrům, které jsou srovnatelné s průměrem jádra vlákna, je velmi snadné navázat optický signál do vlákna. Tyto optické vysílače jsou schopny vysílat optický signál na vlnové délce v rozmezí 700 – 1700nm. Jako nejpoužívanější zdroje záření v přenosové technice se používají dva druhy:

- LED (Light Emitting Diode)
- LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

### 4.1 LED diody

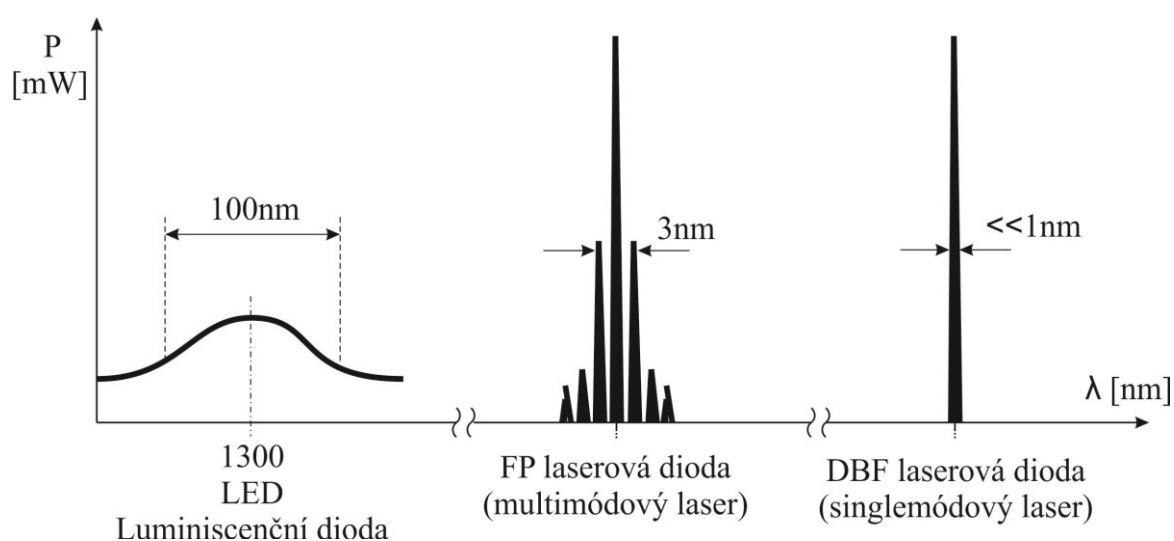
Jako generátory záření se v praxi běžně používají polovodičové diody LED nebo také superluminiscenční SLED diody. Jsou specifické svým nekoherentním monochromatickým zářením se šířkou spektra od 10nm do 100nm a jejich účinnost navázání světla do vlákna je kolem 10 %. Výstupní výkon těchto zdrojů je poměrně malý a dosahuje hodnot řádově desítky až stovky mikrowattů.

#### 4.1.1 Princip činnosti LED diody

Princip činnosti LED diody je založen na rekombinaci volných elektronů a děr. Při rekombinaci se uvolní určité kvantum energie, rovnající se přibližně šířce zakázaného pásu, které se může uvolnit jako záření vycházející ven, nebo je absorbováno v krystalové mřížce. Pravděpodobnost zářivé rekombinace je několikanásobně větší u polovodičů s přímým přechodem.

## 4.2 LASERové diody (LD)

Ne všechny druhy laserů jsou vhodné pro použití v přenosové technice. V praxi se nejvíce používají laserové diody. Laser diody (LD) jsou podstatně dražší, ale díky svým parametrům jsou mnohem výhodnější pro použití než diody LED. Tyto zdroje vykazují monochromatické koherentní záření s vysokou hodnotou zářivosti, malou rozbíhavostí a jejich účinnost je až 90%. Mají velmi velký výstupní výkon, který dosahuje jednotek až desítek miliwattů.



Obr. 7: Spektrální šířka pásma pro LED a LASER diody

### 4.2.1 Princip funkce LASERu

Je zašifrován v anglické zkratce Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (v češtině tzn. 'zesilování světla stimulovanou emisí záření'). V aktivním prostředí laseru musí nejdříve vzniknout inverze populace nositelů náboje.

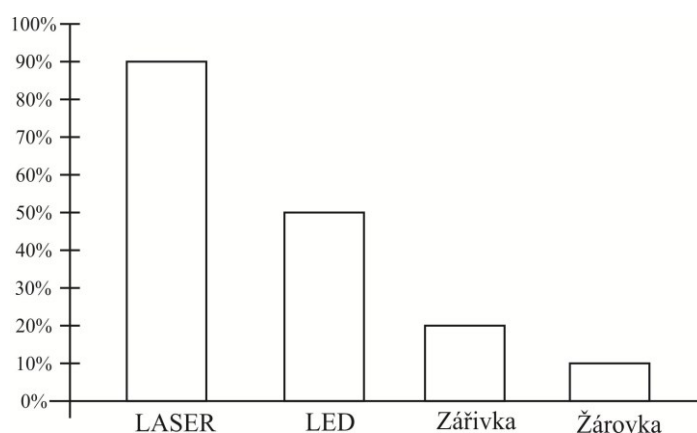
Existuje velké množství různých typů laserových generátorů, z nichž každý má tři základní součásti:

- Laserové aktivní prostředí – v něm dochází k zesilování záření
- Zdroj čerpání – slouží k excitaci aktivního prostředí
- Rezonátor – vytváří zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím vedoucím ke vzniku laserových oscilací

#### 4.2.2 Princip činnosti Laserové diody

Jednodušší typy laserových diod jsou tvořeny PN přechodem z materiálu GaAs. Čelní plochy krystalu jsou zabroušené a tvoří nepropustné a polopropustné zrcadlo. Vlivem rekombinace majoritních nosičů nábojů je v propustném směru PN přechodu vyzařováno světlo. PN přechod je zároveň aktivním prostředím s velkým množstvím atomů v excitovaném stavu. Nově vzniklé fotony narážejí do atomů aktivního prostředí. Nedojde k pohlcení těchto fotonů, ale vytvoří se stimulovaná emise. Elektron z vyšší energetické hladiny se vrací zpět na základní hladinu a vyžáří při tom foton, který způsobil emisi, tedy se stejnou vlnovou délkou a fází. V oblasti PN přechodu se vyskytují tedy již dva fotony, které opět vyvolají stimulovanou emisi u dalších excitovaných atomů. Jev se šíří lavinově. Než je světlo vyzařeno z dutiny polovodiče, několikrát se odrazí od krajních zrcadel, přičemž prochází aktivním prostředím tam a zpět. Při dosažení dostatečné energie svazku se vyžáří čelním polopropustným zrcadlem. Tímto způsobem dojde k zesílení záření důsledkem stimulované emise. Ke generování optického záření tedy dochází důsledkem zavedení kladné zpětné vazby, která část zesíleného signálu z výstupu přivádí na vstup. V současnosti je nejužívanějším rezonátorem v polovodičových laserech Fabry-Perotův rezonátor. Zároveň vlivem destruktivní a nedestruktivní interference vln získává světlo uvnitř dutiny charakter stojatého vlnění a ustaluje se v tzv. módech či videch *obr. 7*. Platí, že rozměry rezonátoru jsou rovny celým násobkům poloviny daných vlnových délek záření. Za této podmínky dojde k optické rezonanci, zesílení světla a z malé čelní plochy vystupuje intenzivní monochromatické, koherentní záření. Vlastnosti diody jsou tedy mimo jiné určeny i geometrií dutiny. Vlnová délka emitovaného záření je také daná složením polovodičů [7].

### 4.2.3 Srovnání zdrojů záření používaných v optoelektronice



Obr. 8: Účinnost světelných zdrojů

Důležitou vlastností světelných zdrojů je účinnost přeměny elektrické energie na energii světelnou. Lasery (LD) mají účinnost až 90%, LED diody okolo 50%, zářivky 20 až 30% a klasické žárovky do 8%.

## 4.3 Optické vlákno

Samotné optické vlákno není zdrojem optického záření. Jedná se o vlnovod ze speciálního materiálu, většinou oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ), ve kterém se může šířit světelné záření. Optická vlákna umožňují přenos světla o vlnových délkách od 220nm do 2400nm. Provozní rozsah teplot je od  $-60^\circ\text{C}$  do  $+120^\circ\text{C}$ . Vlákna se používají v celé řadě aplikací, například k přenosu signálu v telekomunikacích či výpočetní technice. Oproti klasickým vodičům má několik výhod, hlavně vysokou přenosovou rychlost, vysokou odolnost vůči elektromagnetickému šumu a nižší ztráty. Optický signál se v nich může šířit i stovky kilometrů bez nutnosti použít zesilovače.

Většina vláken pracuje v blízké infračervené oblasti spektra a to konkrétně na vlnových délkách 1310nm a 1550nm. V okolí těchto vlnových délek vykazuje světlo minimální útlum v běžně používaných křemenných vláknech. Pro vlnovou délku 1310nm je i materiálová disperze křemenného vlákna minimální, což umožňuje spolu s dalšími technologiemi provozovat komunikační linky s běžnými přenosovými rychlostmi řádu 10 až 100 Gb/s.

## 5 FOTODETEKTORY

Patří mezi nejdůležitější prvky optoelektronického řetězce pro přenos a zpracování signálů. Jejich funkcí je převod dopadající zářivé energie na měřitelnou elektrickou veličinu – napětí, proud nebo změnu fyzikálních vlastností – odpor, vodivost.

Fotodetektory se dělí do dvou skupin podle principu jejich činnosti:

- Tepelné detektory – jsou založeny na přeměně zářivé energie optické vlny na teplo a detekují zvýšenou teplotu některé své části změnou své vlastnosti.
- Kvantové detektory – vychází z přímé interakce fotonů dopadajícího záření s elektrony či krystalovou mřížku materiálu detektoru. Využívají buď vnitřního, nebo vnějšího fotoelektrického jevu.

### 5.1 Parametry fotodetektorů

Fotodetektory jsou charakterizovány mnoha parametry. Mezi ty nejdůležitější patří spektrální citlivost, šumové vlastnosti, dynamické vlastnosti a převodní charakteristika.

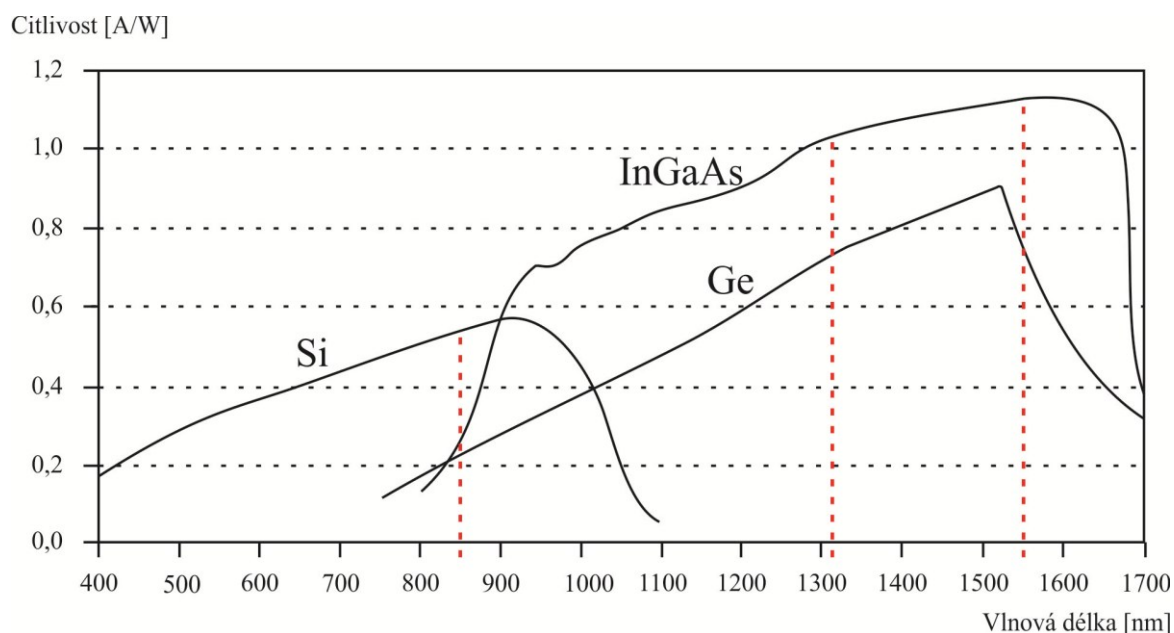
#### Citlivost

Citlivost neboli senzitivita fotodetektoru je definována jako poměr generovaného fotoproudu  $I$  a dopadajícího monochromatického optického výkonu  $P$ . Dopadající optický výkon  $P$  je obvykle měřen ve  $W/cm^2$ , fotoproud diody  $I$  v  $A/cm^2$ . Plochy se tedy při vytváření poměru vykrátí a jednotka citlivosti bude v  $A/W$ .

Citlivost fotodiody:

$$R = \frac{I}{P} \left[ \frac{A}{W} \right]$$

Citlivost fotodiody závisí především na vlnové délce  $\lambda$  dopadajícího záření, na teplotě, na polovodičovém materiálu a příměsích, ze kterých je fotodioda vyrobena. [5]



Obr. 9: Typická spektrální citlivost fotoelektrických detektorů

### Spektrální citlivost

Je závislost citlivosti detektoru na vlnové délce. Charakter této závislosti je pro několik polovodičových materiálů znázorněn na obr. 9. Z obrázku je vidět, že detektor musí být vybrán podle provozní vlnové délky, jinak by jeho citlivost byla nedostatečná. To znamená, že se musí používat detektory s maximem citlivosti, která leží v oblasti použitého „okna“ optického vlnovodu (850, 1310, 1550 nm). Typická spektrální citlivost fotodiod a transmisní okna jsou označena na obr.9.

Spektrální citlivost:  $R = \frac{I_p}{P} \left[ \frac{A}{W} \right]$

Výpočet fotoproudu:  $I_p = \frac{N_e \cdot e}{t}$

Optický výkon:  $P = \frac{N_p \cdot E_p}{t}$

Citlivost se vyjádří:  $R = \frac{N_e}{N_p} \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \left[ \frac{A}{W} \right]$

### Kvantová účinnost

Kvantová účinnost fotodiody je definována poměrem počtu nosičů proudu a počtem fotonů dopadajících na aktivní plochu fotodiody.

$$\eta = \frac{N_e}{N_p h}$$



### Temný proud

Temný proud udává fotoproud generovaný fotodiodou ve fotovodivostním režimu bez přítomnosti dopadajícího záření. Je to důležitý parametr k vyhodnocení odstupu signálu od šumu. Temný proud má povahu náhodné veličiny se spektrální hustotou blízkou bílému šumu. [5]

### NEP

Noise Equivalent Power je optický výkon vyvolávající při detekci fotodiodou elektrický proud srovnatelný se šumovým temným proudem v šířce pásma 1 Hz.

$$NEP = \frac{I_{in}}{R}$$

### Doba odezvy

Je dána dobou, po kterou se generované nosiče nalézají v detektoru před jejich rekombinací. Zavádí se časová konstanta  $\Delta t$ , která definuje dobu, za kterou signál detektoru klesne z 90% na 10% max. hodnoty po ozáření.

### Šířka pásma

Šířka pásma fotodetektoru určuje oblast harmonických frekvencí, které mohou být detekovány bez významného útlumu. Obvykle se uvažuje 3dB šířka pásma představující maximální dovolený pokles přenosu na polovinu. Šířka pásma fotodiody je omezena jednak vnitřními vlivy, především rychlostí generovaných nosičů, dále pak vnějšími elektrickými parametry a zapojením obvodu. Velké šířky pásma se docílí použitím fotodiody s malou aktivní plochou či fotodiodou s širší ochuzenou oblastí. [5]

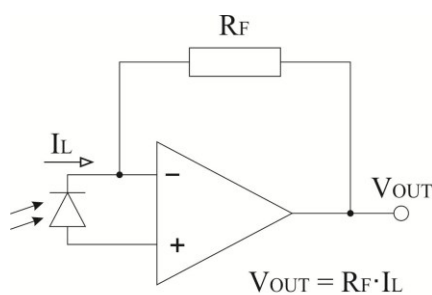
## 5.2 Fotodiody

Polovodičové fotodiody jsou většinou založeny na principu jednoduchého P-N přechodu, dvou rozdílně dopovaných materiálů s vodivostmi typu P a N. V oblasti přechodu vzniká ochuzená vrstva, jejíž parametry jsou určeny typem materiálu, dopováním a přiloženým napětím. Kvanta dopadajícího elektromagnetického záření mohou vyvolat vnitřní fotoelektrický jev a generovat páry elektron a díra. Mezní frekvence  $\nu_{min}$  záření je dána tvarem a velikostí zakázaného pásu použitého polovodičového materiálu. Nosiče náboje generované v ochuzené vrstvě přispívají k elektrickému proudu tekoucímu fotodiodou.

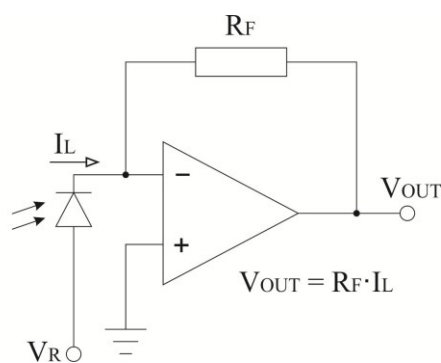
Fotodiody se používají ve dvou základních zapojeních.

**Fotovoltaický režim** – Jednou z nejznámějších aplikací, kde se používá fotovoltaický režim, jsou solární panely. Fotodioda pracuje v nelineární oblasti a po osvětlení generuje napětí, které lze detekovat na elektrodách. Závislost napětí na optickém výkonu dopadajícího záření je nelineární a dynamický rozsah nízký. Používá se pouze tam, kde není zapotřebí rychlé odezvy a velkých výkonů.

**Fotovodivostní režim** – přiložení napětí  $U_{RB}$  v závěrném směru. Rozšíření ochuzené vrstvy snižuje dobu odezvy a zvyšuje pravděpodobnost detekce kvanta záření. Fotodioda bez přítomnosti dopadajícího záření generuje malé množství proudu nazvaného temný proud. Pokud na fotodiodu začne dopadat záření, začne fotodioda generovat nosiče a na výstupu pak lze měřit fotoproud.



Obr. 10: Fotovoltaický režim

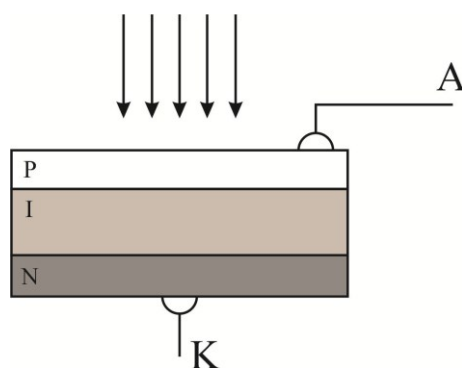


Obr. 11: Fotovodivostní režim

## 5.3 Typy fotodiod

### 5.3.1 PIN fotodioda

PIN fotodioda se skládá ze tří oblastí. Silně dotované P a N oblasti jsou relativně tenké, I oblast je vrstva čistého polovodiče a je relativně tlustá, aby dokázala zachytit všechny dopadající fotony. Tloušťka intrinsické vrstvy se pohybuje přibližně mezi 1 až 200  $\mu\text{m}$ . Čím větší je tedy I vrstva, tím větší je i citlivost fotodiody, naopak zhorší se dynamické vlastnosti jako je šířka pásma.



Obr. 12: Schématické znázornění PIN fotodiody

### 5.3.2 Lavinová (APD) fotodioda

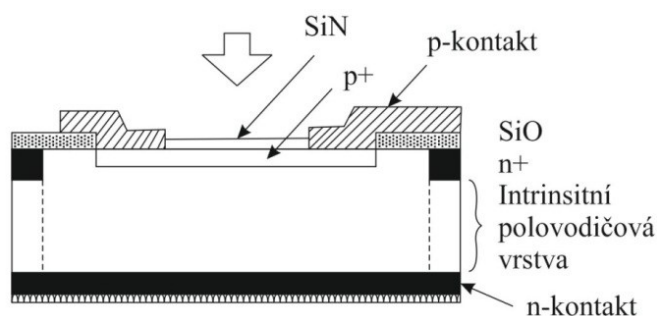
Používá se pro aplikace, kde detektory bez vnitřního zesílení nedosáhnou potřebného zisku. Zapojuje se v závěrném směru a připojuje se na ní vysoké závěrné napětí v řádu desítek až stovek voltů, těsně pod hranicí průrazného napětí. Tím se na přechodu vytvoří velmi silné elektrické pole. Nosiče náboje jsou tak urychlovány, čímž získávají energii, která je dostatečná pro excitaci nových nosičů nárazovou ionizací, nastává lavinový jev.

## 5.4 Nejpoužívanější polovodičové materiály fotodiod

### 5.4.1 Si fotodioda

Křemíková fotodioda je vhodná k detekci viditelného záření a blízké části infračerveného spektra. Největší citlivost křemíkové fotodiody je na vlnové délce přibližně kolem 900nm.

Křemík není jediným materiálem, ze kterého se vyrábějí polovodičové fotodiody. Dalšími polovodičovými prvky jsou germanium a indium, galium a arsenid, které dokáží pracovat s vlnovými délkami ve vzdálenější infračervené oblasti.



Obr. 13: Struktura křemíkové PIN fotodiody

#### 5.4.2 Ge fotodiody

Velkou nevýhodou germániových fotodiód je velký temný proud, který ovlivňuje jejich dynamický rozsah. Výhodou Ge fotodiód je, že se dají sehnat s velkou aktivní plochou za docela rozumnou cenu. Detekovatelný rozsah je 700 až 1800nm, pokryje tak všechna transmisní okna (850nm, 1310nm a 1550nm), pro které má téměř lineární průběh.

#### 5.4.3 InGaAs fotodiody

Indium-galium-arsenid se stejně jako germániová fotodiody používá v průmyslových měřicích optického výkonu. Hodí se totiž k detekci vlnových délek zejména v oblastech transmisních oken 1310 a 1550nm. Oproti germaniové fotodiodě vykazuje InGaAs daleko nižší temný proud a zachovává si velikou spektrální citlivost.

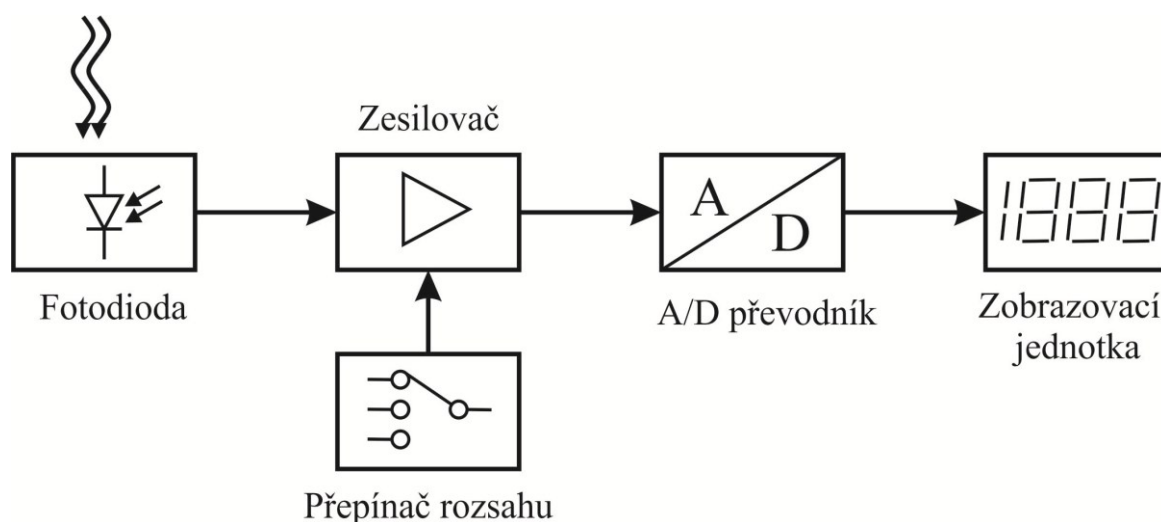
Parametr	Symbol	Jednotka	Si	Ge	InGaAs
Vlnová délka	$\lambda$	nm	400 – 1100	700 – 1800	800 - 1800
Spektrální citlivost	R	A/W	0,4 – 0,6	0,5 – 0,7	0,6 – 1,1
Účinnost	$\eta$	%	75 – 90	50 – 55	60 – 70
Temný proud	$I_d$	nA	1 – 10	50 – 500	1 – 20
Doba náběhu	$T_r$	ns	0,5 – 1	0,1 – 0,5	0,02 – 0,5
Šířka pásma	$\Delta f$	GHz	0,3 – 0,6	0,5 – 3	1 – 10

Tab. 5: Charakteristické parametry PIN fotodiód

## 6 NÁVRH MĚŘIČE OPTICKÉHO VÝKONU

Při návrhu měřiče optického výkonu musíme vycházet z toho, že měřič bude schopný měřit slabé optické výkony (jednotky mikrowattů). Při výběru všech komponent musíme klást velký důraz na to, aby jednotlivé bloky vykazovaly co nejmenší šum.

### 6.1 Blokové schéma měřiče optického výkonu



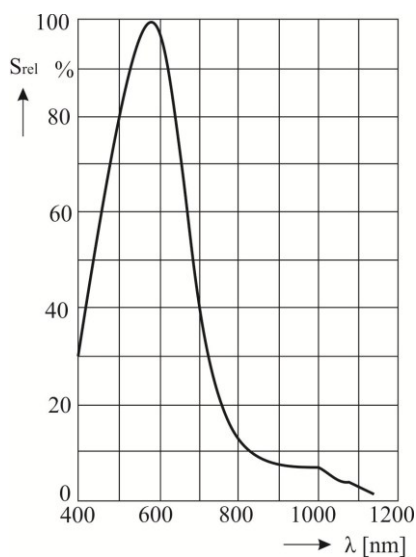
Obr. 14: Jednoduché blokové schéma navrhnutého měřiče optického výkonu

Základními bloky měřiče jsou:

- Polovodičová PIN fotodioda
- Nízkošumový operační zesilovač
- Přepínač rozsahů
- A/D převodník
- Displej

### 6.2 Výběr vhodné fotodiody

K převodu dopadajících fotonů na elektrickou veličinu jsem zvolil fotodiodu od firmy Siemens s označením BPW 21. Jedná se o křemíkovou PIN fotodiodu, jejíž největší předností je docela velká aktivní plocha  $7,34\text{mm}^2$ , na kterou může dopadat záření. Fotodioda dokáže detekovat záření o vlnových délkách  $350 - 820\text{nm}$ , přičemž největší citlivosti dosahuje při  $\lambda = 550\text{nm}$  a to  $0,34\text{A/W}$ . Doba odezvy fotodiody je okolo  $1,5\mu\text{s}$ .



Obr. 15: Spektrální citlivost Si fotodiody BPW 21

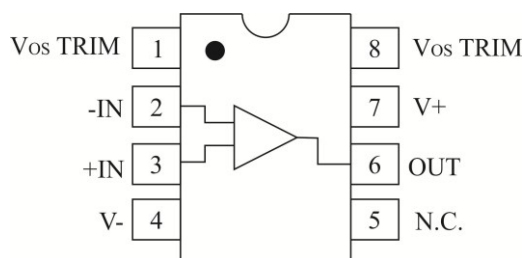
### 6.3 Výběr vhodného zesilovače

Zesilovač musí mít vysokou citlivost a vykazovat velice nízký šum. Dále je potřeba vybrat takový, který bude vyhovovat z hlediska nastavení napěťového rozkmitu od 0V do min. 10V, vzhledem k dynamice A/D převodníku. Těmito parametry disponuje OZ OP07.

#### 6.3.1 Základní parametry OZ OP07

- Napájecí napětí:  $\pm 3V$  až  $\pm 18V$
- Max. vstupní napětí:  $\pm 14V$
- Nízký šum:  $0,6\mu V$  p-p
- Nízký drift:  $1,3\mu V/^{\circ}C$
- Nízký offset:  $30\mu V$  ( $75\mu V$  max.)

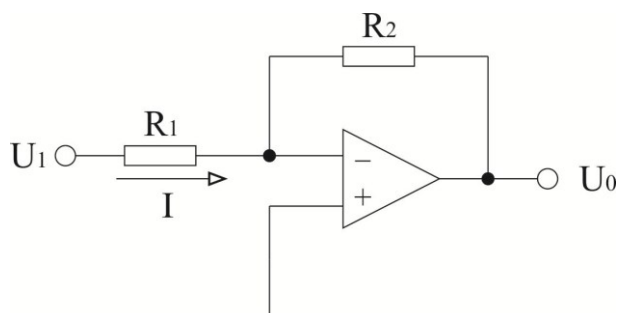
#### 6.3.2 Zapojení pinů obvodu OP07



Obr. 16: Zapojení pinů operačního zesilovače OP07

Operační zesilovač OP-07 potřebuje ke svému provozu napájení symetrickým zdrojem. Zvolil jsem  $\pm 15\text{V}$ , které se přivedou na piny 4 a 7. Pin 2 slouží jako invertující vstup zesilovače, pin 3 jako neinvertující vstup, pin 6 jako výstup zesilovače. Zbývající piny nejsou využity.

### 6.3.3 Zapojení OZ jako převodník proudu na napětí



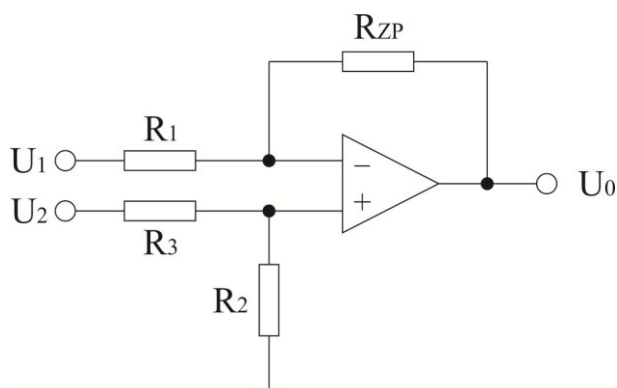
Obr. 17: Základní zapojení převodníku proudu na napětí

Obvod zapojený na obr.16 převádí proudový signál  $I$  na signál napěťový  $U_0$ , přičemž chování se dá popsat následujícím vztahem:

$$U_0 = R_2 \cdot I$$

Vzhledem k tomu, že rozdíl napětí na vstupech OZ se pohybuje v řádu desítek až stovek  $\mu\text{V}$ , chová se tento obvod jako ampérmetr, na kterém je úbytek napětí v desítkách až stovek  $\mu\text{V}$ . Vstupní proud  $I$  samozřejmě nemůže být větší, než může dodat výstup OZ. [9]

### 6.3.4 Zapojení OZ jako diferenční zesilovač



Obr. 18: Základní zapojení diferenčního zesilovače

V měřicí technice se často používá operační zesilovač zapojený jako diferenční zesilovač. Toto zapojení se používá pro sledování dvou signálů s velmi málo odlišnými hodnotami napětí, výstupní napětí úměrné rozdílu napětí na vstupech. Typické zapojení diferenčního zesilovače je na *obr. 17*. Lze na něj pohlížet tak, že invertující zesilovač zesiluje napětí  $U_1$  a neinvertující zesilovač zesiluje  $U_2$ , takže napětí  $U_2$  musí být zmenšeno odporovým děličem  $R_3/R_2$ , tak aby zesílení obou větví bylo stejné.

Musí přesně platit:  $R_3 = R_1$ ,  $R_2 = R_{zp}$

Má-li diferenční zesilovač skutečně zesilovat jen rozdílové napětí, musí se dodržet následující podmínka:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{U_{zp}}{R_2}$$

To znamená, že dvojice odporů  $R_2$  a  $R_3$  musí být ve stejném poměru jako  $R_{zp}$  a  $R_1$ . Jinak situaci komplikuje souhlasný signál. Velmi záleží na tom, aby použité odpory byly přesné. Výstupní napětí je dáno vztahem:

$$U_0 = \frac{R_{zp}}{R_1} \cdot (U_2 - U_1)$$

Rovnice platí pro ideální zesilovač, ale ve skutečném zapojení se příliš neliší. Je z ní vidět, že rozdíl vstupních napětí se násobí poměrem určujícím velikost zesílení. V praxi se většinou používá složitější zapojení diferenčního zesilovače, které eliminuje vliv odporů zdrojů napětí  $U_1$  a  $U_2$ . [9]



## 6.4 Výběr A/D převodníku a displeje

Analogově digitální převodník je elektronická součástka určená pro převod analogového (spojitého) signálu na signál digitální (diskrétní). Analogově – digitální převod lze rozdělit na tři základní fáze:

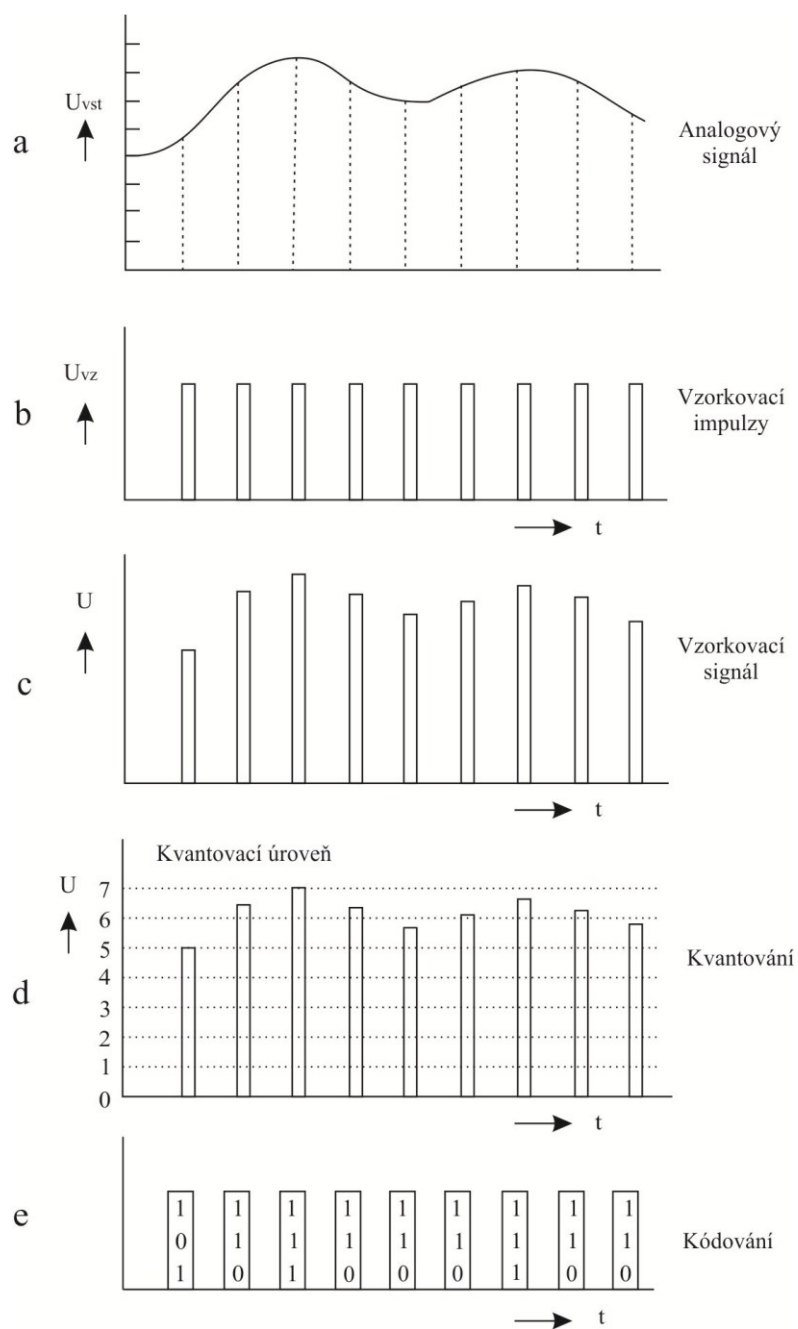
- Vzorkování
- Kvantování
- Kódování



Obr. 19: Funkční schéma A/D převodu

Při vzorkování se pravidelně odebírají vzorky amplitudy analogového signálu (obr. 20a), nejméně dvojnásobným opakovacím kmitočtem s nejvyšší kmitočtovou složkou analogového signálu. K takto získaným diskretním vzorkům (obr. 20c) se přiřadí napěťové úrovně (obr. 20d). Tomuto procesu se říká kvantování. Leží-li hodnota diskretního vzorku mezi kvantovacími úrovněmi, přiřadí se k bližší úrovni (např. způsobem zaokrouhlování). Počet rozhodovacích úrovní je  $2^n$ , kde  $n$  je rovno počtu bitů pro vyjádření hodnoty jednoho vzorku. Nakonec se provede kódování (obr. 20e), při kterém se kvantovaná úroveň vyjádří v určitém kódu, například binárním.

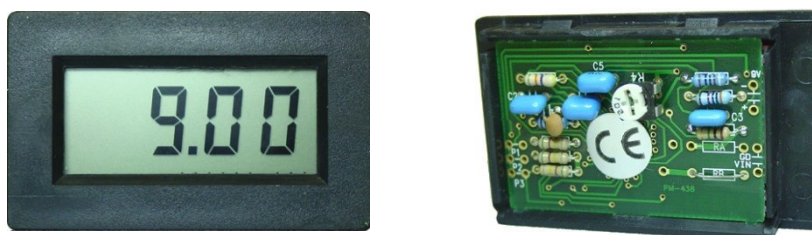
[14]



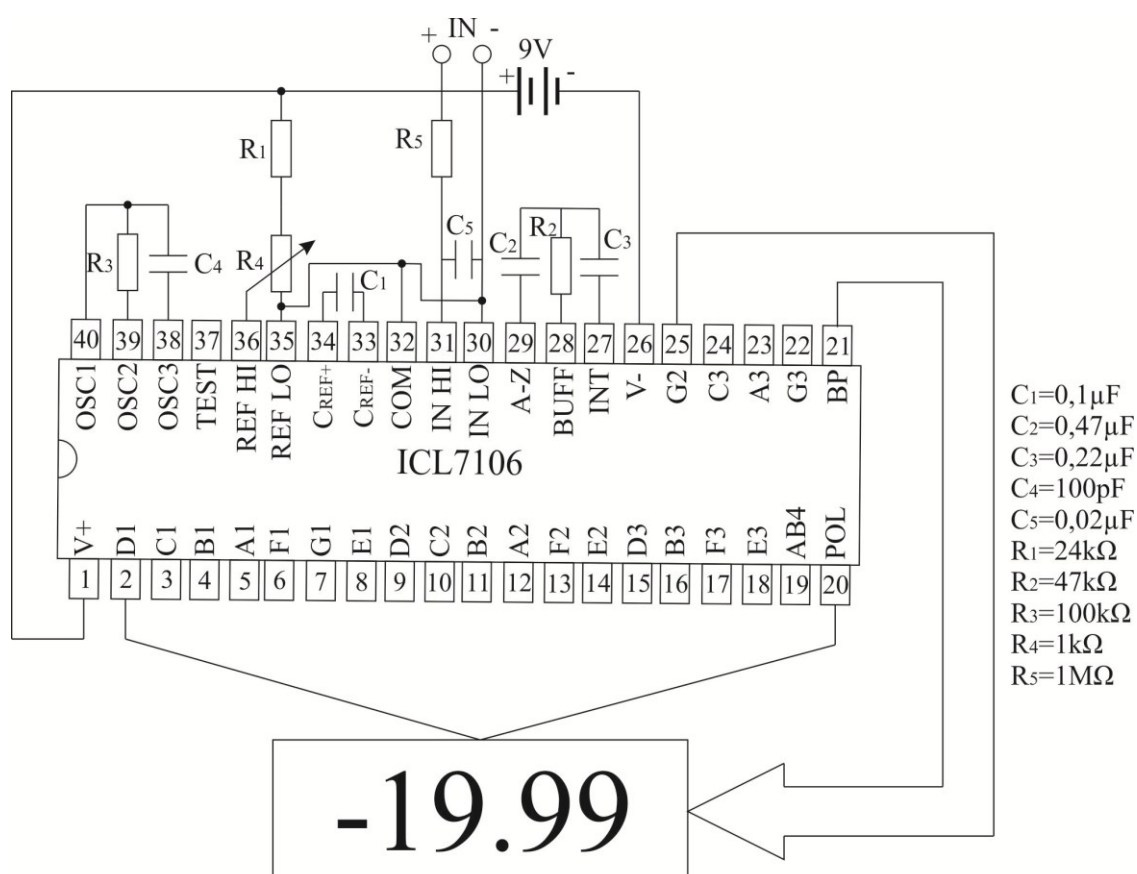
Obr. 20: Analogově digitální převod

Jako vhodný A/D převodník může posloužit ICL7106 Intersil. Dokáže převést vstupní napětí a zobrazit jej na 3 a ½ místný LCD display.

Panelový digitální voltmetr PM-438 obsahuje převodník ICL7106 v SMD provedení. Výsledek měření zobrazuje 2 až 3 krát za sekundu. Napájení PM438 je 7 – 11V DC, je tedy vhodné zvolit 9V baterii.

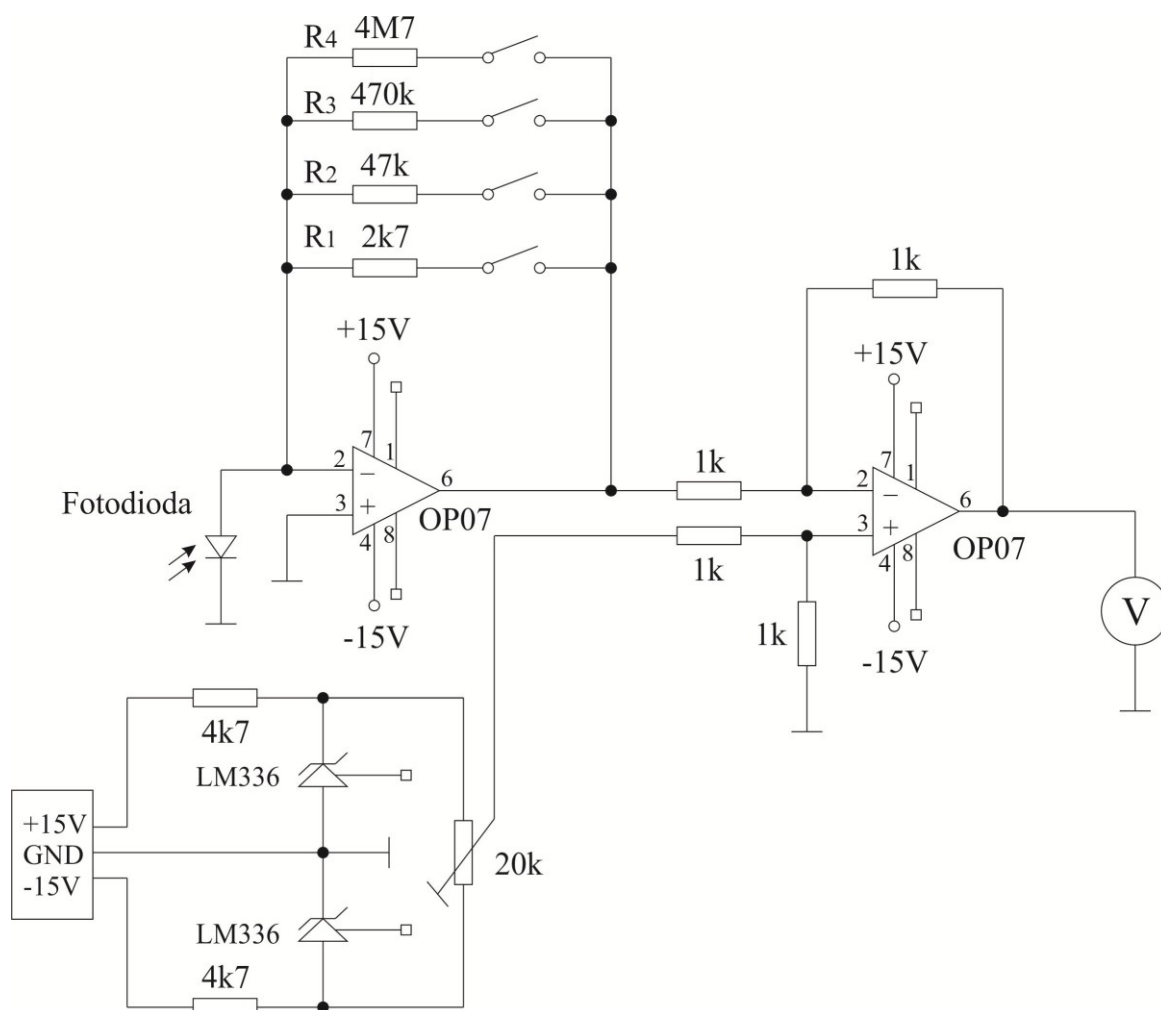


Obr. 21: Digitální panelový voltmetr PM 438



Obr. 22: Zapojení pinů A/D převodníku ICL7106

## 6.5 Schéma měřiče optického výkonu



Obr. 23: Schéma měřiče optického výkonu

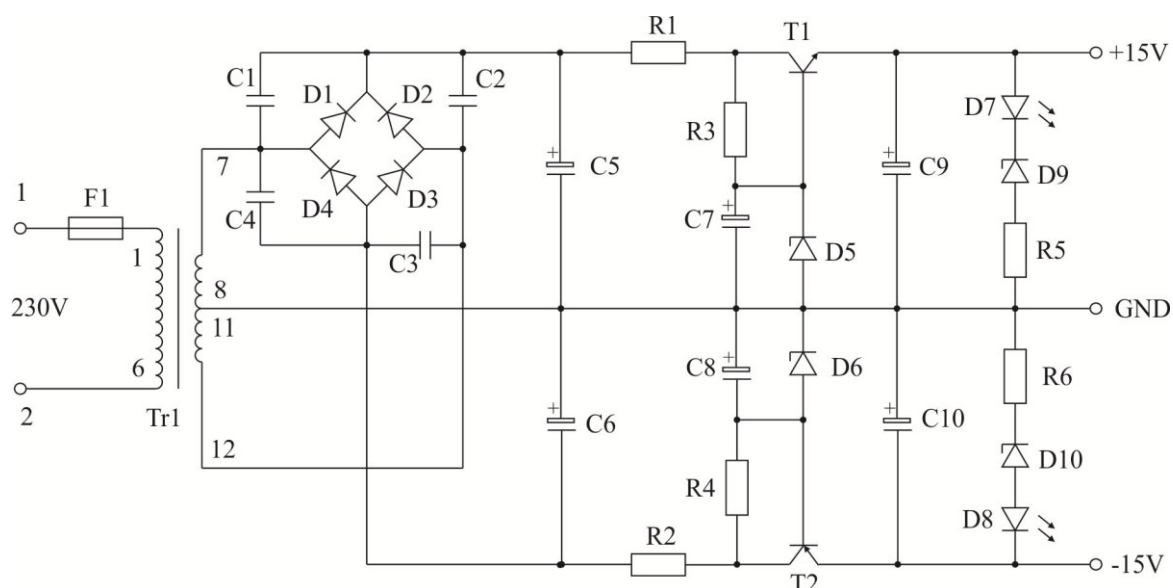
První OZ slouží jako převodník proudu na napětí pomocí zvoleného rozsahu ve zpětné vazbě. Výstup tohoto zesilovače je přiveden na neinvertující vstup druhého OZ, který plní funkci diferenčního zesilovače. Na invertující vstup je připojena kompenzace offsetu, realizována napětíovou referencí LM336 a víceotáčkovým trimrem. Pomocí tohoto kompenzačního obvodu můžeme nastavit nulovou hodnotu napětí na výstupu druhého operačního zesilovače při zatemnění fotodiody.

Na výstup druhého OZ je zapojen A/D převodník a displej. Pro zjednodušení je ve schématu uveden pod schématickou značkou voltmetru. Na obr. 22 je zachyceno zapojení A/D převodníku ICL7106 jako obvod digitálního voltmetru.

Maximální výstupní napětí z 2. OZ je omezeno saturací. Hodnota saturačního napětí je přibližně 13V při napájení  $\pm 15V$ . Proto je vhodné použít digitální voltmetr s nastavením rozsahu 20V.

## 6.6 Zdroj napětí

Měřič potřebuje ke svému provozu stabilizovaný zdroj symetrického napětí. Pro dostatečný rozkmit operačních zesilovačů jsem zvolil  $\pm 15V$ . Realizace takového zdroje napětí pomocí akumulátorů je dosti nepraktická. Nabízí se tedy možnost použití stavebnicového zdroje.



Obr. 24: Schéma síťového stabilizovaného symetrického zdroje napětí

Napětí ze sítě je přes pojistku F1 přivedeno k primárnímu vinutí transformátoru Tr1. Za sekundárním vinutím je můstkový Greatzův usměrňovač D1-D4 a obvody stabilizátorů tvořené T1 společně s R3, C7, D5 pro +15V a T2 s R4, C8, D6 pro -15V. C5 a C6 filtrují usměrněné napětí. Rozpiska součástek a jejich hodnoty jsou uvedeny v příloze.

## 6.7 Nalezení potřebných rozsahů

		ROZSAH (hodnota, kterou musíme změřený výkon vynásobit)				
		$\times 10\text{mW}$	$\times 1\text{mW}$	$\times 100\mu\text{W}$	$\times 10\mu\text{W}$	$\times 1\mu\text{W}$
Vlnové délky	400nm	3k7	57k	575k	5M7	57M
	500nm	3k3	51k	510k	5M1	51M
	<b>555nm</b>	<b>2k7</b>	<b>47k</b>	<b>470k</b>	<b>4M7</b>	<b>47M</b>
	600nm	2,12k	44k	446k	4M5	45M
	700nm	1,13k	21k	211k	2M1	21M
	800nm	850	16,6k	170k	1M7	17M

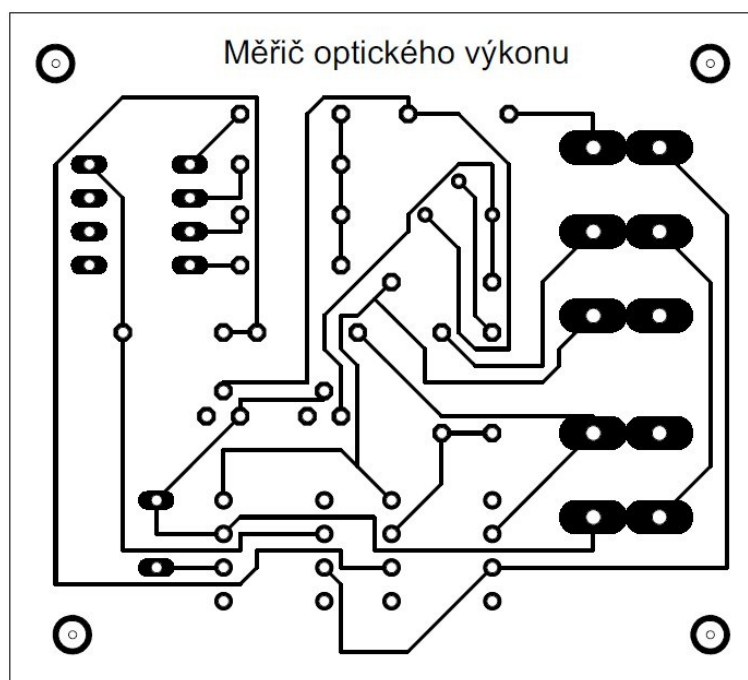
*Tab. 6: Hodnoty rezistorů v přepínači rozsahů pro vlnové délky*

Pomocí referenčního měřiče opt. výkonu jsem na zvolené vlnové délce nastavil zdroj opt. záření tak, aby referenční měřič ukazoval  $20\mu\text{W}$ . Poté jsem ke zdroji připojil vlastní měřič a pomocí víceotáčkových trimrů v přepínači rozsahů jsem nastavoval hodnoty pro každý rozsah odpovídající  $20\mu\text{W}$ . Postup jsem opakoval pro každou vlnovou délku.

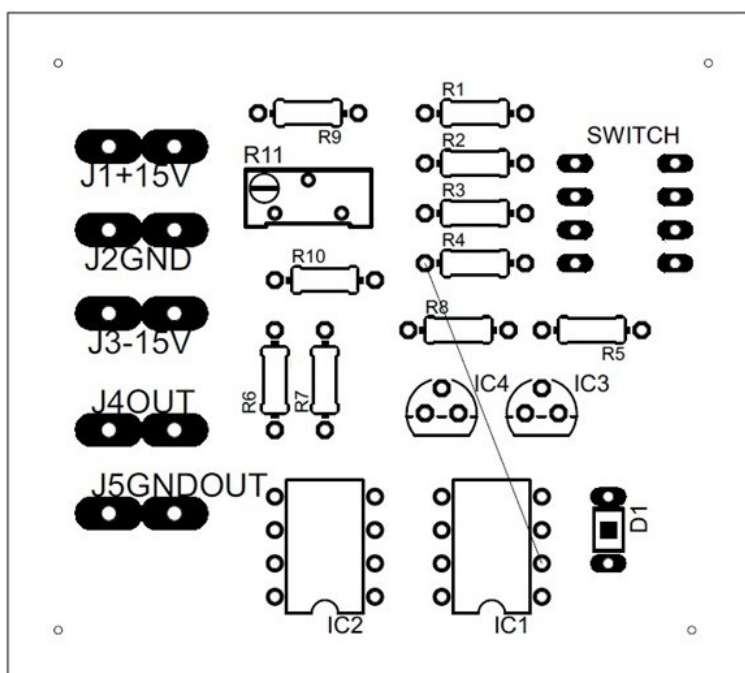
## 7 REALIZACE FUNKČNÍHO MODELU MĚŘIČE OPTICKÉHO VÝKONU

### 7.1 Zhotovení desky plošného spoje

Návrh měřiče a jeho odladění jsem prováděl na nepájivém poli. Deska plošného spoje je navržena v programu Eagle. Při návrhu se vycházelo ze zapojení uvedeném v *obr. č. 23*. Vzhledem k nevelkému počtu součástek byla snaha, aby deska plošného spoje byla jednovrstvá, což se podařilo. Rozměry desky plošného spoje jsou 60 x 54 mm.



*Obr. 25: Deska plošného spoje, strana spojů*



Obr. 26: Deska plošného spoje, osazení součástkami

## 7.2 Osazení a oživení měřiče optického výkonu

Desku plošného spoje osazujeme nejprve konektory faston do DPS 4,8 x 0,8, které jsem použil pro přivedení napájecího napětí (J1, J2 a J3), stejné konektory jsou i na zdroji. Dále osazujeme desku rezistory, nakonec integrovanými obvody. Pro fotodiodu jsem použil univerzální precizní patici. Přepínač rozsahu se propojí vodiči nejlépe délky 80mm s otvory na DPS na pozici switch. Otvory J4 a J5 přivedeme na vstup digitálního voltmetru.

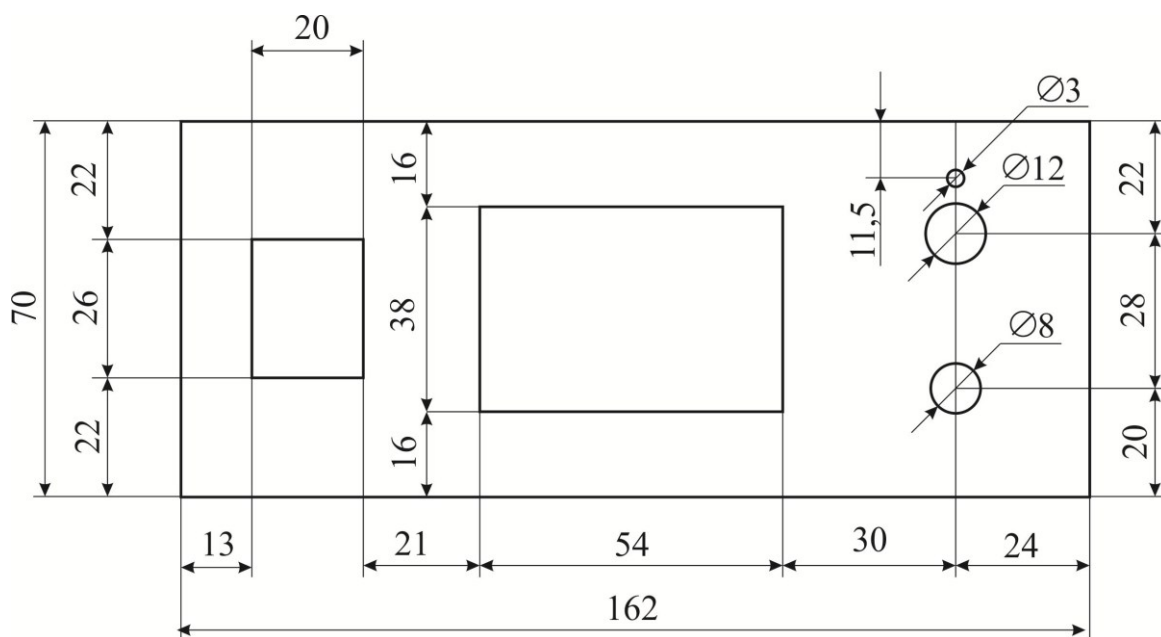
### 7.2.1 Panelový digitální voltmetr

Voltmetr je v továrním nastavení schopen měřit v rozsahu 199,9mV. Potřebujeme ale měřit vstupní rozsah 19,99V, což docílíme změnou rezistorů v napěťovém děliči. Detailní nastavení pro všechny možné měřicí rozsahy jsou uvedeny v příloze DP.



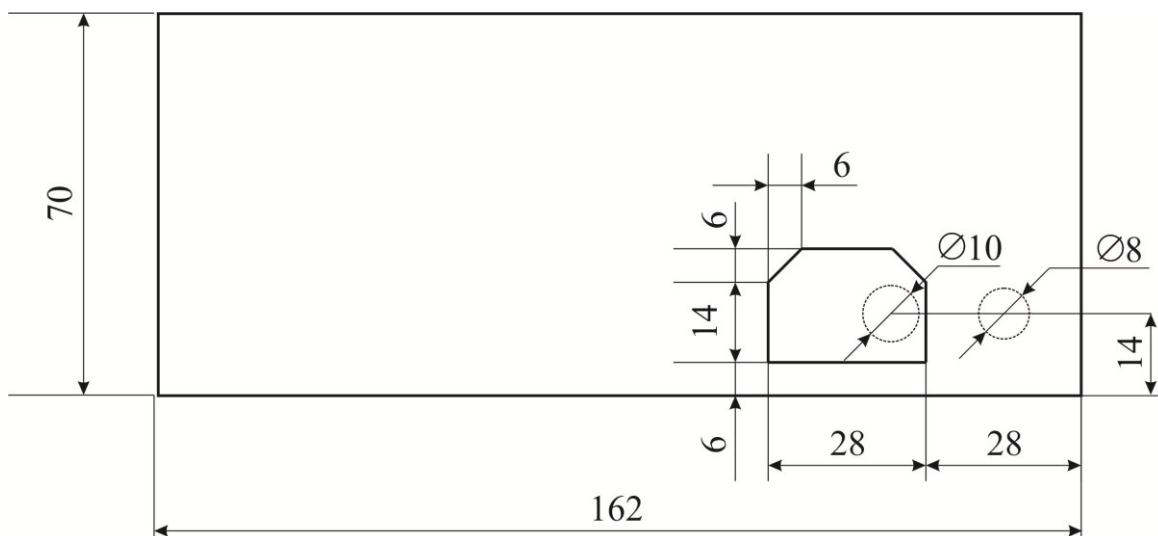
### 7.3 Mechanická konstrukce

Aby byly všechny komponenty chráněny a držely pohromadě, je vhodné je umístit do přístrojové krabice. Dbal jsem při tom, že na přední panel budu muset umístit displej, vypínač, přepínač rozsahu a konektor fotodiody. Z tohoto důvodu jsem vybral kovovou přístrojovou krabičku U-KK07-160 z ocelového plechu o rozměrech 162 x 70 x 217 mm (šířka, výška, hloubka) od výrobce EZK.



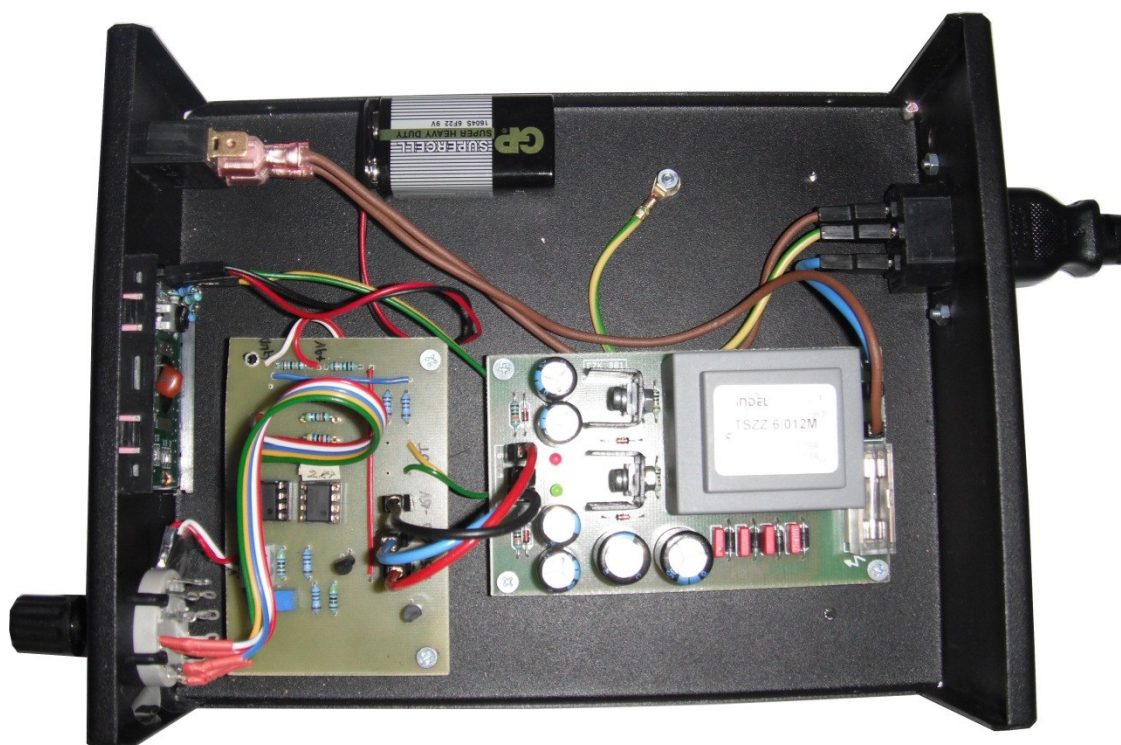
Obr. 27: Rozmístění otvorů na čelním panelu krabičky U-KK07-160

Čelní panel je opatřen výřezy pro vypínač, LCD displej, otočný přepínač a pro zapouzdřenou fotodiodu. Pozici pro fotodiodu a přepínač rozsahů jsem umístil na pravou stranu krabičky pro snadné ovládání pravou rukou. Přepínač SR112 je nutné nastavit na požadovaný počet rozsahů (v našem případě jsou to 4 rozsahy) pomocí přidané závlačky. Aby bylo možné přepínač dobře ukotvit a neprotáčet se při přepínání rozsahů, je umístěn do dvou otvorů. Displej je zasazen do otvoru 54 x 38 mm, kde bezproblémově drží pomocí zpětných háčků. Otvor 26 x 20 mm je pro umístění dvoupólového vypínače, který slouží k přivedení napájecího napětí 230VAC a současně pro zdroj 9V DC baterii pro digitální voltmetr.



Obr. 28: Rozmístění otvorů na zadní straně krabičky U-KK07-160

Pro usnadnění přenosu měřiče je zadní strana krabičky osazena síťovým napájecím EURO konektorem GSD781, pro přívodní napájecí kabel. Krabička měla z výroby na zadní straně dva otvory pro přívodní kabely. Na místo jednoho z nich je tedy vhodné konektor zabudovat, druhý osadit gumovou zásepkou.



Obr. 29: Osazení krabičky DPS, pohled zezhora

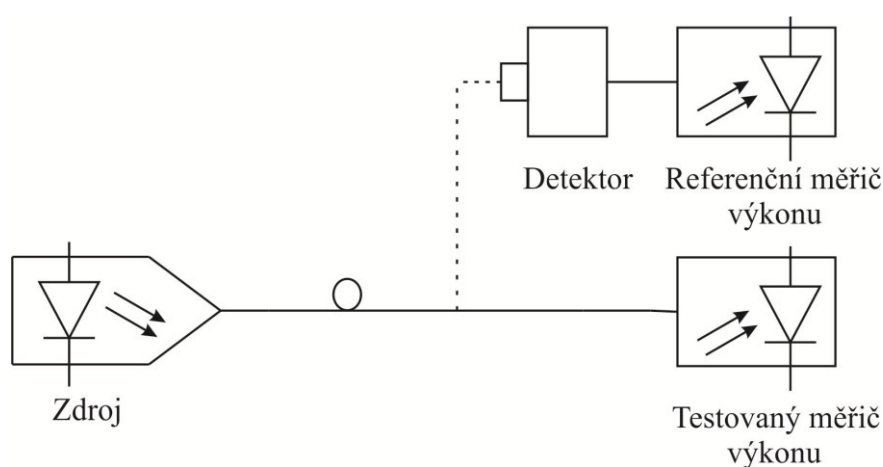
Otvory pro umístění modulu měřiče a zdroje jsou do krabičky vyvrtány o průměru 2,5mm a poté opatřeny závity s průměrem 3mm. Plastové distanční sloupky je po umístění vhodné zkrátit, aby nepřesahovaly zespodu krabičky.

## 8 NAMĚŘENÉ HODNOTY

### 8.1 Spotřeba elektrického proudu

Samostatný modul měřiče měl proudový odběr 3mA. LCD displej je velice úsporný a vezme si kolem 1mA. Můžeme říci, že sestavený měřič optického výkonu má proudový odběr maximálně 5mA.

### 8.2 Mez citlivosti měřiče optického výkonu



Obr. 30: Měření meze citlivosti měřiče optického výkonu

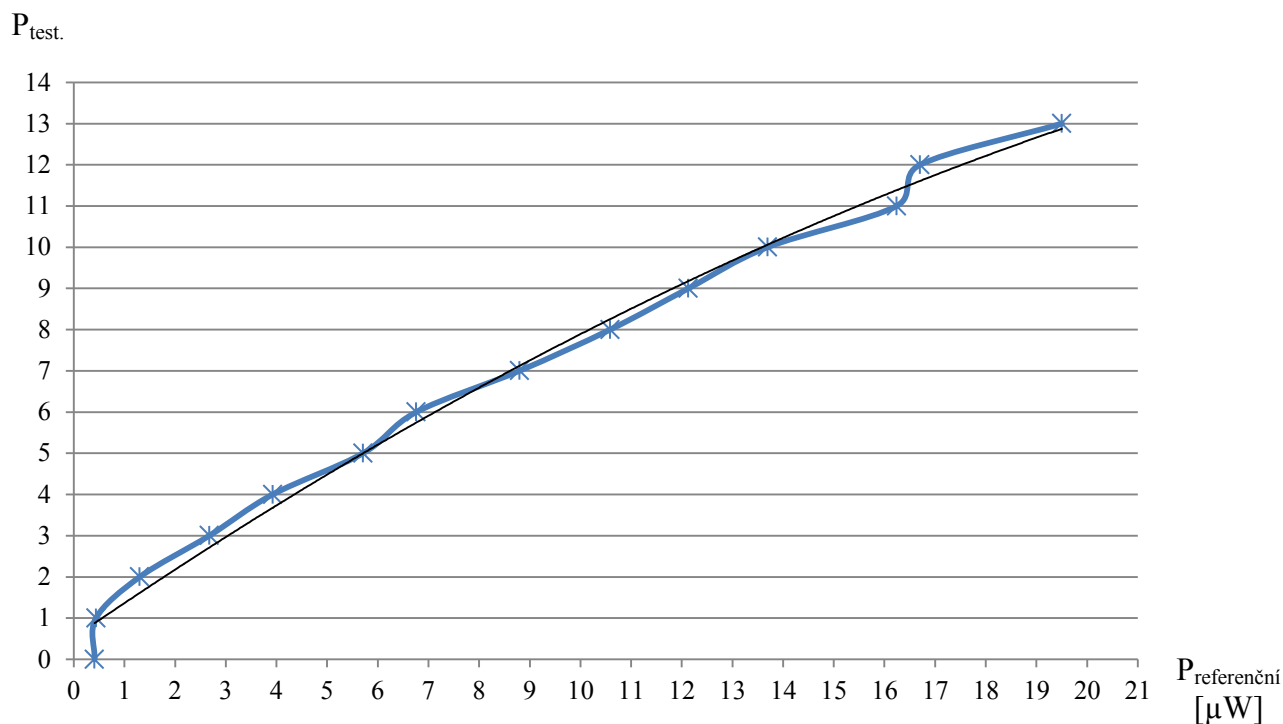
Použité přístroje a materiál:

- Měřič optického výkonu Thorlabs PM30
- Zdroj optického záření (Stolní lampa)
- Optické vlákno SC 50/125
- Samocentrující se stojany Thorlabs SCL04 2x

#### Postup měření:

Mez citlivosti měřiče získáme tak, že zdroj optického záření připojíme k testovanému měřiči optického výkonu a nastavíme určitou hodnotu výkonu. Ten pak porovnáme s hodnotou z referenčního měřiče výkonu. Měření jsem prováděl 10x, aby byla zajištěna objektivnost měření. Výsledky jsem zaznamenal do přehledného *grafu č.1* a proložil jej regresivní křivkou. Měření jsem provedl pro vlnové délky  $\lambda = 555\text{nm}$ . Snažil jsem se zajistit takové podmínky, aby fotodioda byla co nejvíce odstavena od okolního osvětlení.

Především nás zajímají hodnoty kolem počátku charakteristiky (nulových hodnot). Při navázání průměrného výkonu  $0,411\mu\text{W}$  na fotodiodu, nevykazoval testovaný měřič výkonu žádný přírůstek. Lze tedy konstatovat, že se zde nachází mez citlivosti měřiče optického výkonu.



Graf č.1 Mez citlivosti měřiče optického výkonu

P <sub>test.</sub>	P <sub>referenční</sub> [μW]										Průměr hodnot
	Měření										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	0,42	0,41	0,42	0,42	0,43	0,42	0,41	0,41	0,39	0,39	<b>0,411</b>
1	0,44	0,48	0,46	0,44	0,43	0,42	0,42	0,42	0,43	0,44	0,438
2	1,29	1,33	1,32	1,33	1,28	1,30	1,31	1,28	1,28	1,29	1,301
3	2,64	2,68	2,64	2,64	2,68	2,64	2,67	2,66	2,80	2,68	2,674
4	3,94	3,89	3,94	3,94	3,91	3,92	3,94	3,92	3,88	3,89	3,924
5	5,76	5,75	5,69	5,77	5,76	5,67	5,69	5,69	5,67	5,68	5,708
6	6,77	6,79	6,81	6,77	6,75	6,75	6,73	6,72	6,76	6,76	6,760
7	8,87	8,79	8,86	8,85	8,80	8,76	8,78	8,78	8,69	8,88	8,795
8	10,64	10,58	10,59	10,63	10,58	10,59	10,61	10,54	10,56	10,54	10,584
9	12,11	12,10	12,12	12,12	12,14	12,10	12,14	12,14	12,12	12,16	12,129
10	13,72	13,68	13,69	13,70	13,69	13,72	13,72	13,68	13,67	13,66	13,691
11	16,29	16,24	16,23	16,24	16,25	16,22	16,24	16,24	16,22	16,24	16,240
12	16,71	16,72	16,69	16,69	16,73	16,68	16,68	16,70	16,70	16,72	16,702
13	19,54	19,45	19,50	19,55	19,57	19,44	19,47	19,52	19,50	19,50	19,503

*Tab. 7: Hodnoty z referenčního měřiče a testovaného měřiče optického výkonu*

## 9 SEZNAM SOUČÁSTEK A MATERIÁLU

Součástka	Označení	Hodnota	Pouzdro / počet kusů
Fotodioda	BPW-21		TO5
Rezistor	R1	2k7	R0207
Rezistor	R2	47k	R0207
Rezistor	R3	470k	R0207
Rezistor	R4	4M7	R0207
Rezistor	R5	1k	R0207
Rezistor	R6	1k	R0207
Rezistor	R7	1k	R0207
Rezistor	R8	1k	R0207
Rezistor	R9	4k7	R0207
Rezistor	R10	4k7	R0207
Operační zesilovač	OP07		DIL8
Operační zesilovač	OP07		DIL8
Napěťová reference 5V	LM336		TO-92
Napěťová reference 5V	LM336		TO-92
Trimr víceotáčkový	R11	20k	64Y
Panelový voltmetr LCD	PM438		
Přepínač otočný	SR112-OKO		1ks
EURO konektor	GSD781		1ks
Vypínač dvoupólový	P-B127A		1ks
Zdroj symetrický $\pm 15V$	MZD0115		1ks
Faston do DPS	FS18701-BL		3ks
Počítačový konektor	KONPC-SPK-PI		4ks
Počítačový konektor	KONPC-SPK-1		4ks
Faston na kabel 4,8 x 0,8mm	FS70218-BS		9ks
Faston na kabel 6,3 x 0,8mm	FS7048-BS		2ks
Šroubky M3			9ks
Distanční sloupky plastové	KDA6M3X12		8ks
Přístrojová krabice	U-KK07-160		1ks
Napájecí síťový kabel třípólový	IEC320-C13 EU		1,8m
Držák 9V baterie	SN9V1		1ks
9V baterie			1ks
Knoflík otočný násuvný	KP1406 BLK		1ks

## 10 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce je popis a realizace měřiče optického výkonu. Navržený model umožňuje měření optického výkonu v přibližném rozsahu  $1\mu\text{W}$  až  $10\text{mW}$ . Pro vyšší výkony by se musely odladit a přidat další rozsahy. Zmíněný rozsah měřiče odpovídá úrovnovým hladinám  $-30\text{dBm}$  až  $+10\text{dBm}$ .

Měření a odladění měřiče jsem prováděl na kontaktním nepájivém poli. Návrh desky plošného spoje je proveden v programu Eagle. Finální výrobek jsem umístil do plechové přístrojové krabice, kterou jsem opatřil otvory pro přesné umístění všech komponent.

Kalibraci jednotlivých rozsahů jsem prováděl za pomoci referenčního měřiče optického výkonu značky Thorlabs PM30. Jako zdroj optického záření mi posloužila obyčejná stolní lampa. Výstupní hodnoty z tohoto měřiče jsou pouze orientační, ať už vzhledem ke způsobu kalibrace, tak i absenci mikroprocesorové jednotky, která by v paměti obsahovala uloženou kalibrační křivku. Dalším prvkem, který měl velký podíl na zhoršení podmínek, byla fotodiody. Vhodnější zakonektorovanou s větší citlivostí a lineárním průběhem jsem však neměl k dispozici.

Mez citlivosti je dána především citlivostí fotodiody. Měřič je určitě schopen změřit hodnoty menších výkonů než je  $0,41\mu\text{W}$ , potřeboval by však vyměnit stávající fotodiodu za zakonektorovanou. Navázání světelného paprsku z optického vlákna na aktivní plochu fotodiody jsem prováděl pomocí stojanů s centrováním na střed. I přes docela velkou aktivní plochu fotodiody BPW21 jsem nedokázal zajistit přesné navázání světelného paprsku na střed a pod pravým úhlem, takže vznikala chyba v měření. V laboratoři jsem měl problém zajistit takové potlačení rušivých vlivů okolního prostředí, které by mi pomohlo k naměření nižších hodnot výkonu.

Tato práce může sloužit jako návod k výrobě levného a jednoduchého měřiče optického výkonu.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] YOSHIKAWA, Tōru. *Handbook of optical metrology: principles and applications*. Boca Raton: CRC Press, c2009, 730 s. ISBN 08-493-3760-7.
- [2] TRICKER, Ray. *Optoelectronics and fiber optic technology*. Boston: Newnes, c2002, 319 s. ISBN 07-506-5370-1.
- [3] JOHNSON, Mark. *Photodetection and measurement: maximizing performance in optical systems*. New York: McGraw-Hill, 2003, 298 s. ISBN 00-714-0944-0.
- [4] ČSN EN 61315. *Kalibrace měřidel optického výkonu pro vláknovou optiku*. Srpen 2006. Český normalizační institut, 2006.
- [5] SLODIČKA, L., M. JEŽEK a M. MIČUDA. *Přenos a detekce optického signálu: Soubor experimentálních úloh*. Olomouc, 2007. FRVŠ. Přírodovědecká fakulta univerzity Palackého Olomouc.
- [6] AGRAWAL, G. *Lightwave technology: components and devices*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2004, 427 s. ISBN 0-471-21573-2.
- [7] SALEH, Bahaa E. *Základy fotoniky: fundamentals of photonics*. 1. vyd. Překlad Miloslav Dušek. Praha: Matfyzpress, 1995, 778 s. ISBN 80-858-6305-7.
- [8] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [9] JOHNSON, David. *Handbook of Optical Through the Air Communications*. [online]. [cit. 2012-04-08].  
Dostupné z: <http://www.imagineeringezine.com/ttaoc-pdf/OTTAC-Handbook.PDF>
- [10] MORAVEC, Zdeněk. *Operační zesilovače*. [online]. [cit. 2012-03-14].  
Dostupné z: <http://z-moravec.net/elektronika/operacni-zesilovace/diferencni-zesilovac/>
- [11] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.

- [12] GRAEME, Jerald G. *Photodiode amplifiers: op amp solutions*. Boston: McGraw-Hill, 1996, 252 s. ISBN 00-702-4247-X.
- [13] *Optoelektronika: Prvky, signály a soustavy v optoelektronice*. Skripta. Vysoké učení technické v Brně.
- [14] Český metrologický institut [online]. 20.04.20012 [cit. 2012-04-12].  
Dostupné z: <http://www.cmi.cz/>
- [15] WALT KESTER, Editor. *Analog-digital conversion* [online]. S.I.: Analog Devices, 2004 [cit. 2012-04-12]. ISBN 09-165-5027-3.  
Dostupné z: [http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-06/data\\_conversion\\_handbook.html](http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-06/data_conversion_handbook.html)
- [16] Hamamatsu: Photon is our business. [online]. [cit. 2012-04-27].  
Dostupné z: <http://www.hamamatsu.com/>
- [17] Thorlabs. [online]. [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/>
- [18] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2012. vyd. [cit. 2012-04-28].  
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/>
- [19] *Optické kabeláže: budoucnost počítačových sítí* [online]. [cit. 2012-04-12].  
Dostupné z: <http://www.optickekabelaze.cz/>
- [20] *Vláknová optika na telekomunikačních vlnových délkách: Soubor experimentálních úloh* [online]. 2008. vyd. [cit. 2012-04-22].  
Dostupné z: [http://www.mu.joptol.cz/jezek/publications/frvs2008\\_Hradil\\_skriptum.pdf](http://www.mu.joptol.cz/jezek/publications/frvs2008_Hradil_skriptum.pdf)
- [21] AIP: Review of Scientific Instruments. [online]. [cit. 2012-03-13].  
Dostupné z: <http://www.rsi.aip.org/>

## Seznam obrázků:

<i>Obr. 1: Rozdělení elektromagnetického spektra.....</i>	<i>str.3</i>
<i>Obr. 2: Rozdělení optického spektra.....</i>	<i>str.3</i>
<i>Obr. 3: Měřič výkonu s odnímatelnou hlavicí a měřič s integrovaným detektorem.....</i>	<i>str.8</i>
<i>Obr. 4: Blokové schéma měřiče optického výkonu.....</i>	<i>str.8</i>
<i>Obr. 5: Kalibrace nelinearity sčítací metodou (superpozice).....</i>	<i>str.9</i>
<i>Obr. 6: Porovnávání etalonů.....</i>	<i>str.10</i>
<i>Obr. 7: Spektrální šířka pásma pro LED a LASER diody.....</i>	<i>str.12</i>
<i>Obr. 8: Účinnost světelných zdrojů.....</i>	<i>str.14</i>
<i>Obr. 9: Typická spektrální citlivost fotoelektrických detektorů.....</i>	<i>str.16</i>
<i>Obr. 10: Fotovoltaický režim.....</i>	<i>str.18</i>
<i>Obr. 11: Fotovodivostní režim.....</i>	<i>str.18</i>
<i>Obr. 12: Schématické znázornění PIN fotodiody.....</i>	<i>str.19</i>
<i>Obr. 13: Struktura křemíkové PIN fotodiody.....</i>	<i>str.19</i>
<i>Obr. 14: Jednoduché blokové schéma měřiče optického výkonu.....</i>	<i>str.21</i>
<i>Obr. 15: Spektrální citlivost Si fotodiody BPW 21.....</i>	<i>str.22</i>
<i>Obr. 16: Zapojení pinů operačního zesilovače OP07.....</i>	<i>str.22</i>
<i>Obr. 17: Základní zapojení převodníku proudu na napětí.....</i>	<i>str.23</i>
<i>Obr. 18: Základní zapojení diferenčního zesilovače.....</i>	<i>str.23</i>
<i>Obr. 19: Funkční schéma A/D převodu.....</i>	<i>str.25</i>
<i>Obr. 20: Analogově digitální převod.....</i>	<i>str.26</i>
<i>Obr. 21: Digitální panelový voltmetr PM 438.....</i>	<i>str.27</i>
<i>Obr. 22: Zapojení pinů A/D převodníku ICL7106.....</i>	<i>str.27</i>
<i>Obr. 23: Schéma měřiče optického výkonu.....</i>	<i>str.28</i>
<i>Obr. 24: Schéma síťového stabilizovaného symetrického zdroje napětí.....</i>	<i>str.29</i>
<i>Obr. 25: Deska plošného spoje, strana spojů.....</i>	<i>str.31</i>
<i>Obr. 26: Deska plošného spoje, osazení součástkami.....</i>	<i>str.32</i>
<i>Obr. 27: Rozmístění otvorů na čelním panelu krabičky U-KK07-160.....</i>	<i>str.33</i>
<i>Obr. 28: Rozmístění otvorů na zadní straně krabičky U-KK07-160.....</i>	<i>str.34</i>
<i>Obr. 29: Osazení krabičky DPS, pohled zezhora.....</i>	<i>str.34</i>
<i>Obr. 30: Měření meze citlivosti měřiče optického výkonu.....</i>	<i>str.36</i>

## Seznam tabulek a grafů:

<i>Tab. 1: Rozdělení IR pásma pro účely optické komunikace.....</i>	<i>str.4</i>
<i>Tab. 2: Spektrální barvy s odpovídajícími intervaly vlnových délek.....</i>	<i>str.4</i>
<i>Tab. 3: Přehled jak přepočítat výkon ve Wattech a dBm.....</i>	<i>str.7</i>
<i>Tab. 4: Nejlepší schopnosti kalibrace.....</i>	<i>str.8</i>
<i>Tab. 5: Charakteristické parametry PIN fotodiod.....</i>	<i>str.20</i>
<i>Tab. 6: Hodnoty rezistorů v přepínači rozsahů pro vlnové délky.....</i>	<i>str.30</i>
<i>Tab. 7: Hodnoty z referenčního měřiče a testovaného měřiče optického výkonu.....</i>	<i>str.38</i>

## **Příloha:**

Příloha 1: Seznam součástek síťového zdroje stabilizovaného symetrického napětí

Příloha 2: Fotodokumentace

Příloha 3: Spektrální charakteristika měřiče optického výkonu

## **Obsah přiloženého CD:**

Diplomová práce ve formátu pdf

Diplomová práce ve formátu doc

Katalogové listy fotodiody BPW21

Katalogové listy operačního zesilovače OP07

Katalogové listy panelového digitálního voltmetru PM438

Desky plošného spoje a jeho osazení v programu EAGLE

Matice pro výrobu plošného spoje ve formátu pdf

..

## SEZNAM SOUČÁSTEK SÍŤOVÉHO ZDROJE STABILIZOVANÉHO SYMETRICKÉHO NAPĚTÍ

Součástka	Označení	Hodnota	Pouzdro	Počet kusů
Rezistor	R1, R2	10R	R0207	2ks
Rezistor	R3,R4	2k7	R0207	2ks
Rezistor	R5,R6	3k3	R0207	2ks
Kondenzátor	C1,C2,C3,C4	22n/100V	TC	4ks
Kondenzátor	C5,C6	1m/35V	ELRA	2ks
Kondenzátor	C7,C8,C9,C10	1m/25V	ELRA	4ks
Dioda	D1,D2,D3,D4	1N4007		4ks
Dioda	D5,D6	BZX55/16V		2ks
Dioda	D7	L934LID		1ks
Dioda	D8	L934LGD		1ks
Dioda	D9,D10	BZX55/10V		2ks
Tranzistor	T1	BD139		1ks
Tranzistor	T2	BD140		1ks
Transformátor 230V/2x18V	Tr	TSZZ6/012M		1ks
Faston VSP 4,8x0,8				5ks
Držák pojistky izolovaný				1ks
Šroub M3 x 8				2ks
Podložka 3,2				2ks
Podložka 3,2 pérová				2ks
Matice M3				2ks
Chladič D3				2ks
Pojistka	F1	PP T63mA		1ks

## Fotodokumentace

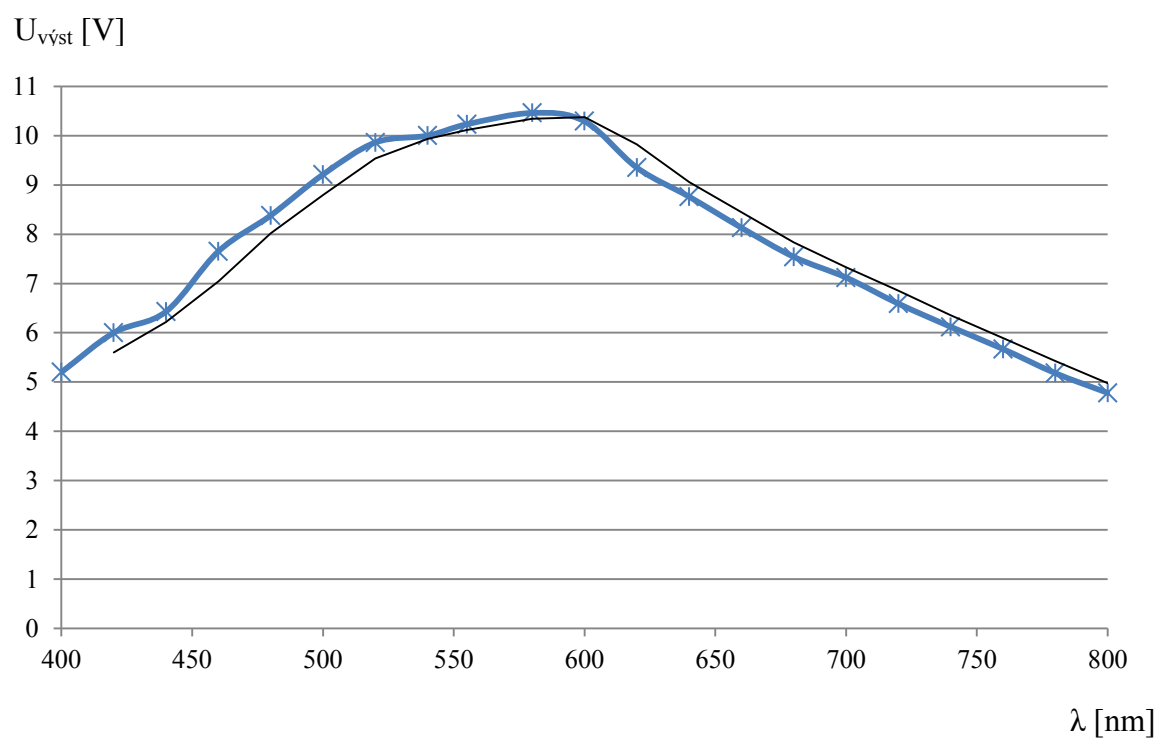


*Sejmutý vrchní kryt z měřiče optického výkonu*



*Pohled zepředu na měřič optického výkonu*

## Spektrální charakteristika měřiče optického výkonu



$\lambda[\text{nm}]$	$U_{\text{výst.}} [\text{V}]$
400	5,20
420	6,0
440	6,43
460	7,65
480	8,38
500	9,21
520	9,86
540	10,00
555	10,23
580	10,46
600	10,29
620	9,35
640	8,76
660	8,13
680	7,54
700	7,12
720	6,59
740	6,12
760	5,67
780	5,18
800	4,78